DEFECTOS O IMPERFECCIONES EN SÓLIDOS

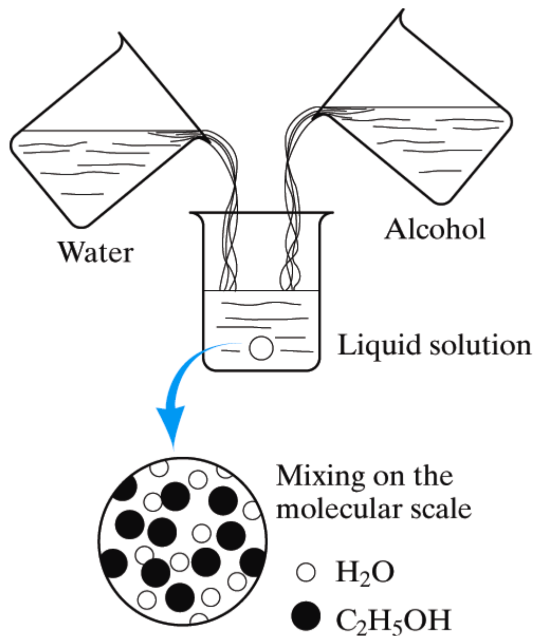
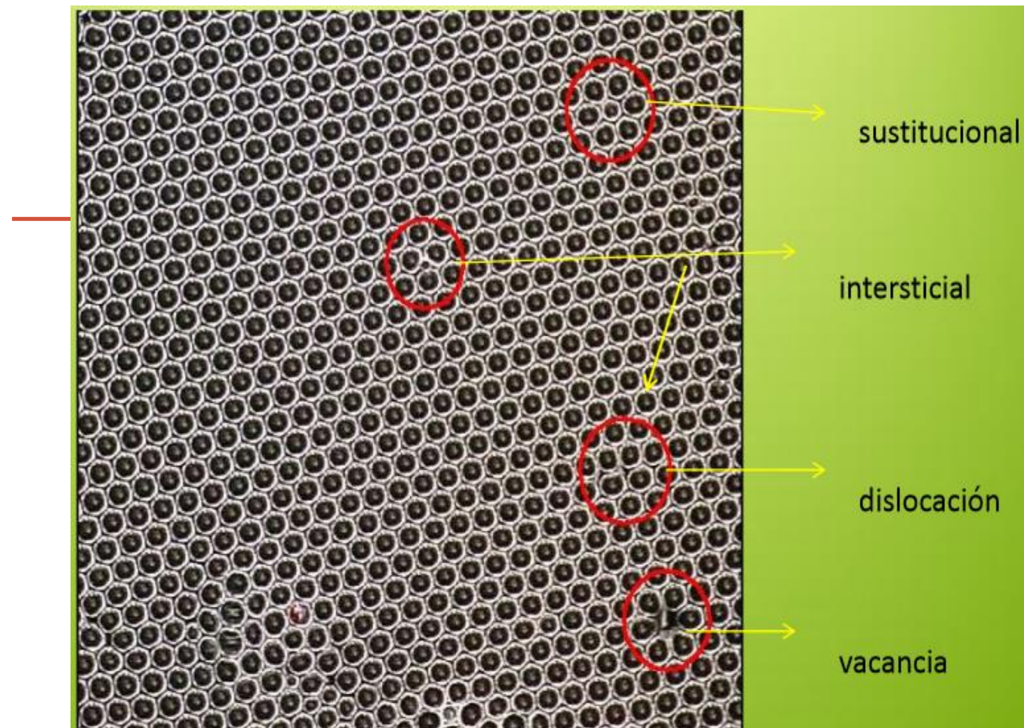


Figure 4.1

Forming a liquid solution of water and alcohol. Mixing occurs on the molecular scale.



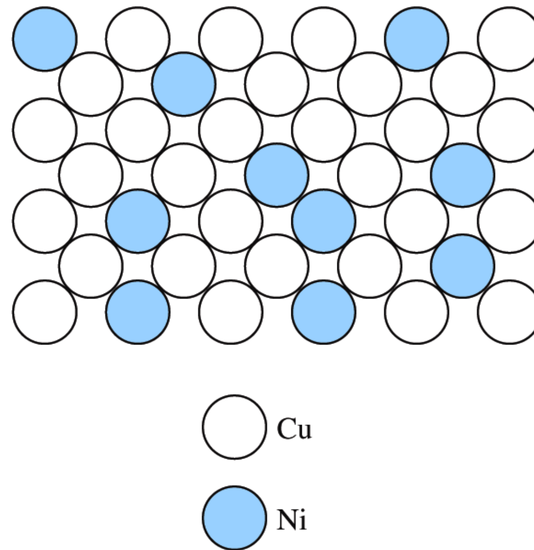


Figure 4.2

Solid solution of nickel in copper shown along a (100) plane. This is a substitutional *solid solution with nickel atoms substituting for copper atoms on fcc atom sites.*

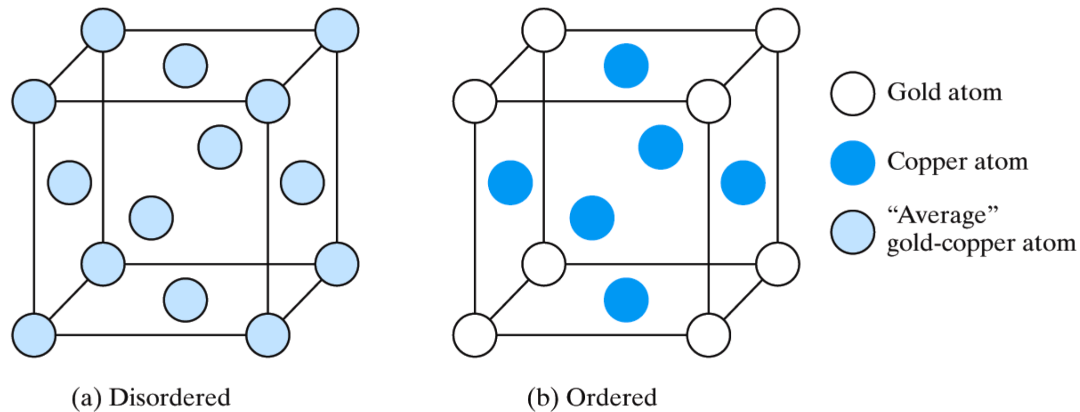


Figure 4.3

Ordering of the solid solution in the $AuCu_3$ alloy system. (a) Above ~ 390°C, there is a random distribution of the Au and Cu atoms among the fcc sites. (b) Below ~ 390°C, the Au atoms preferentially occupy the corner positions in the unit cell, giving a simple cubic Bravais lattice. (From B. D. Cullity and S. R. Stock, Elements of X-Ray Diffraction*, 3rd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2001.)*

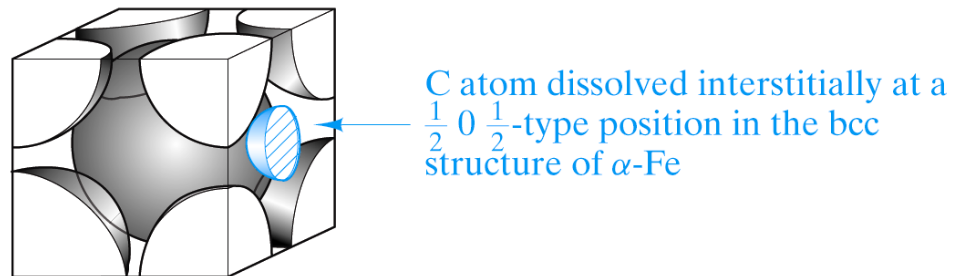
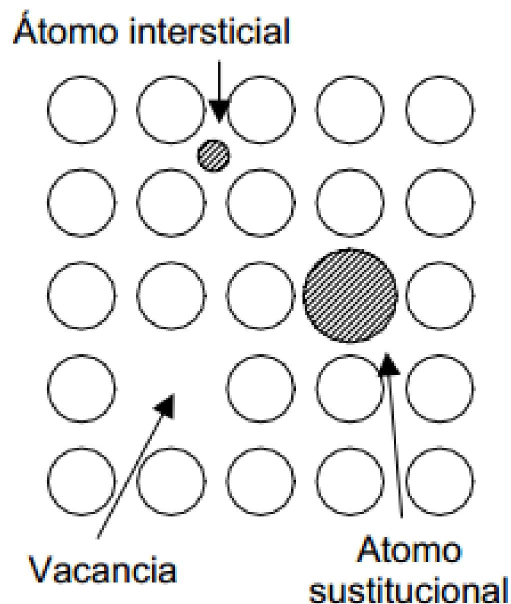


Figure 4.4

Interstitial solid solution of carbon in α-iron. The carbon atom is small enough to fit with some strain in the interstice (or opening) among adjacent Fe atoms in this structure of importance to the steel industry. [This unit-cell structure can be compared with that shown in Figure 3.4b.]

DEFECTOS PUNTUALES

Imperfecciones asociadas a los puntos reticulares cristalinos. Se pueden introducir por el movimiento de átomos con la temperatura, durante el procesamiento del material, por introducción de impurezas, etc.



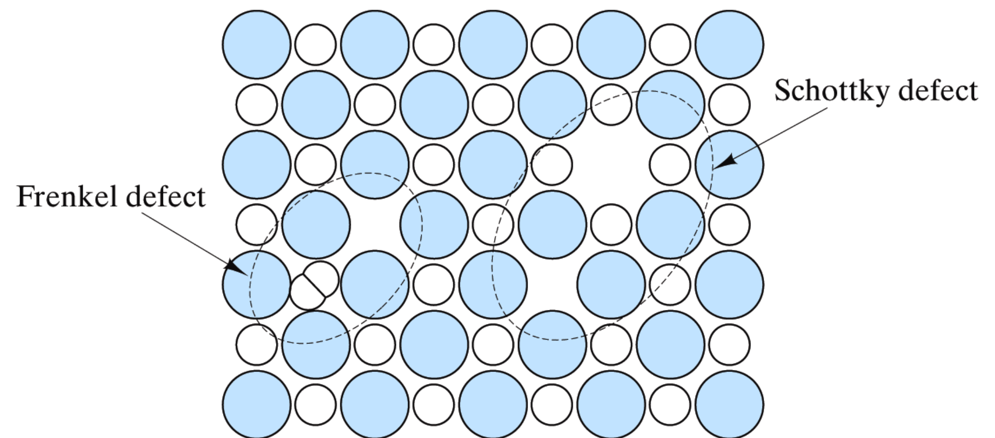


Figure 4.9

Two common point defect structures in compound structures are the Schottky defect and the Frenkel defect. Note their similarity to the structures shown in Figure 4.8.

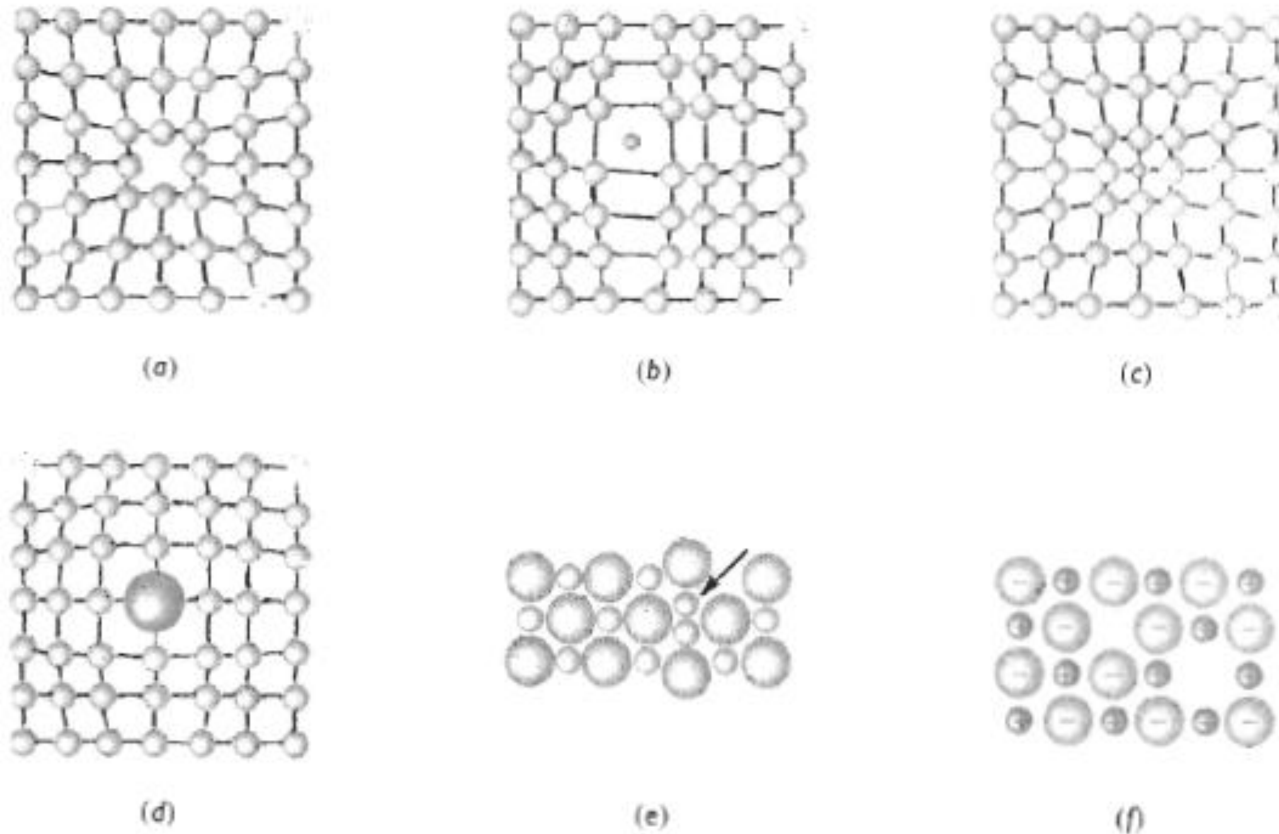
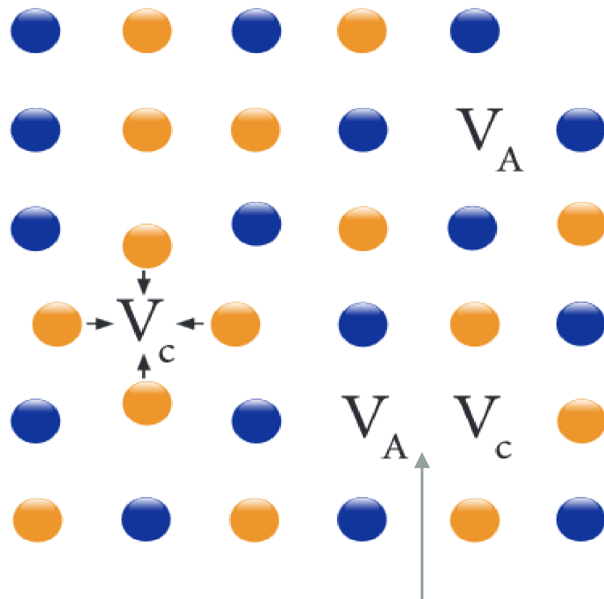


FIGURA 4-11 Defectos puntuales: (a) vacancia; (b) pequeño átomo intersticial; (c) átomo sustitucional; (d) átomo sustitucional grande; (e) defecto Frenkel y (f) defecto Schottky. Todos estos defectos alteran el arreglo perfecto de los átomos circundantes.

$$N_v = N \exp\left(-\frac{Q_v}{kT}\right)$$

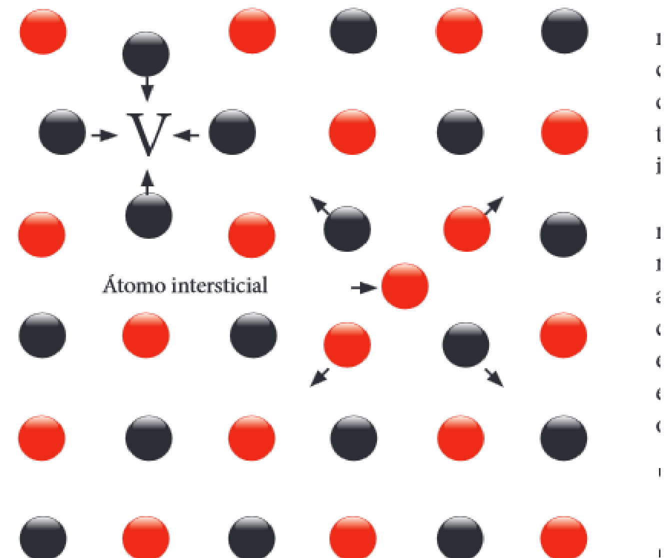
Q_v es la energía necesaria para producir una mol de vacancias , N es el número total de lugares ocupados por átomos.



Consiste en un par de vacantes de iones de carga opuesta, para mantener la neutralidad de carga en la estructura. El número de vacancias catiónicas tiene que ser igual, EN FUNCIÓN DE CARGA, al número de vacancias aniónicas. El NaCl tiene 70.000 vacancias por cm cúbico.

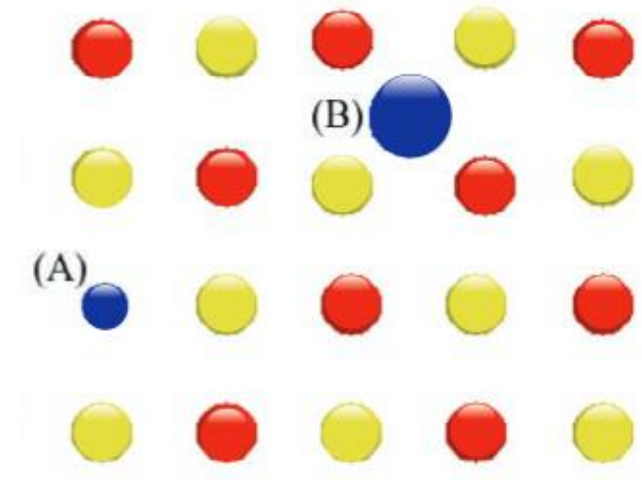
Las vacancias pueden ser vecinos

Es una combinación de una vacante mas un átomo intersticial.



Las impurezas pueden ser átomos intersticiales y sustitucionales. Se debe de tener en cuenta el tamaño y la valencia de la impureza.

Ejemplo Al_2O_3= Se reemplaza el Al^{3+} por Cr^{3+} (es mas grande) genera al presión en el crista (grietas).



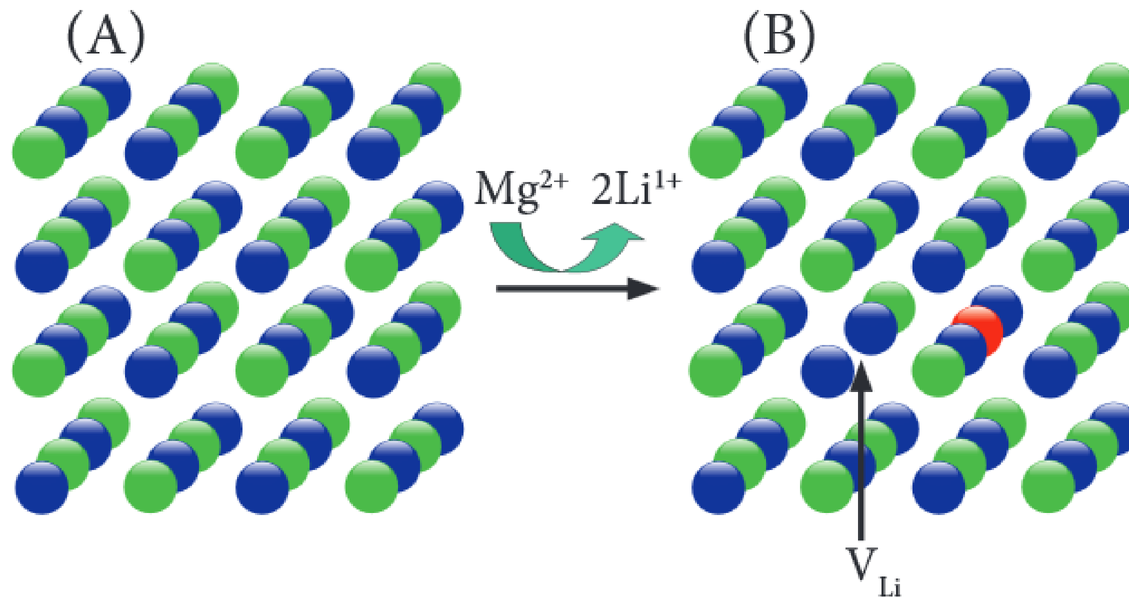


Figura 4. Cristal de fluoruro de litio (LiF) con la presencia de un átomo sustitucional de magnesio (Mg^{2+}). A) cristal puro de LiF, y B) cristal de LiF sustituido con un átomo de Mg^{2+}.

Diferencia de valencia: sustitución de un átomo de de Li por un átomo de Mg. Se perderá un átomo de Li para mantener la electroneutralidad: se genera una vacancia.

DISLOCACIONES: Defectos lineales

Están asociadas principalmente con la deformación mecánica

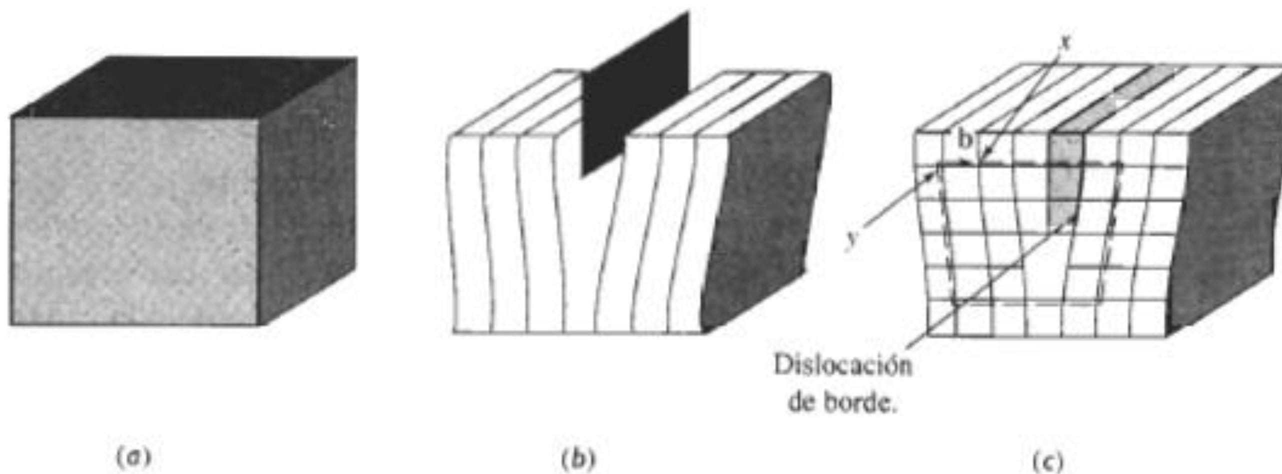


FIGURA 4-2 El cristal perfecto (a) es cortado y un plano adicional de átomos es insertado (b).El borde inferior del plano adicional es la dislocación de borde (c). Se requiere de un vector de Burgers **b** para cerrar un círculo de igual cantidad de espaciamientos atómicos alrededor de la línea de dislocación.

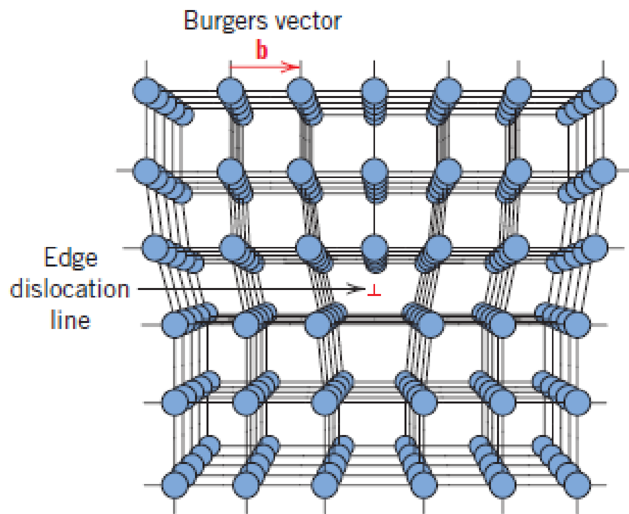


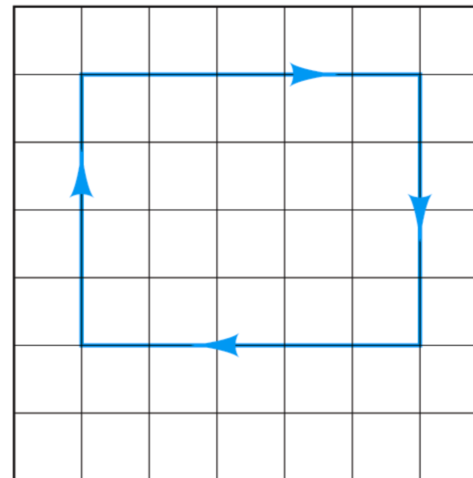
Figure 4.3 The atom positions around an edge dislocation; extra half-plane of atoms shown in perspective. (Adapted from A. G. Guy, *Essentials of Materials Science,* McGraw-Hill Book Company, New York, 1976, p. 153.)

El vector de Burgers: expresa la magnitud (longitud) y la dirección de distorsión reticular asociada a la dislocación.

Es el que se necesita para cerrar el circuito fig. b

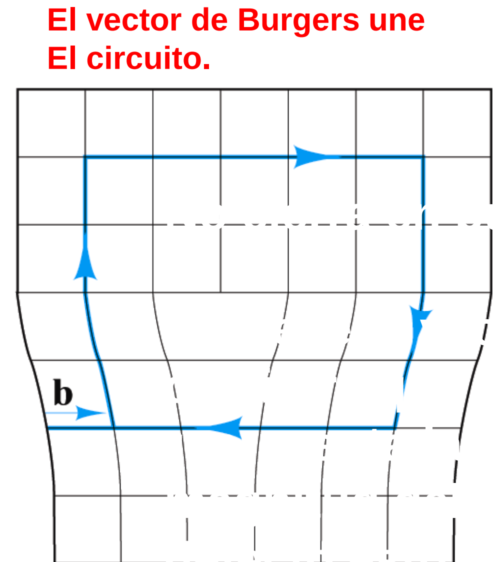
La dislocación se mueve aprox. una unidad atomica

El vector de Burgers une El circuito.



Se recorren 4 unidades hacia todos los unidades

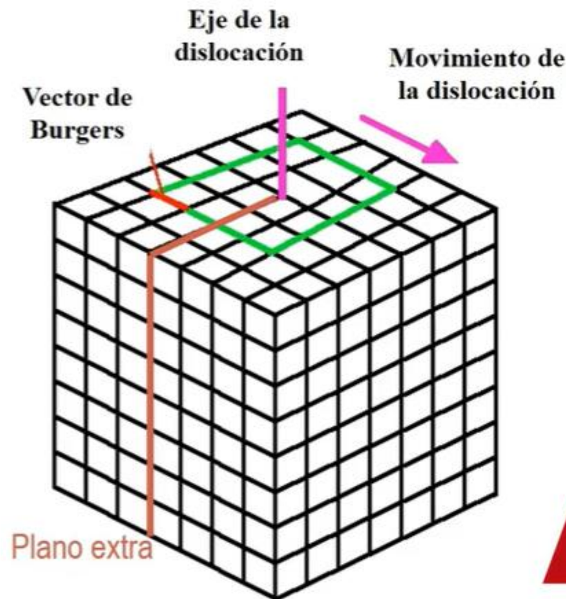
(a)



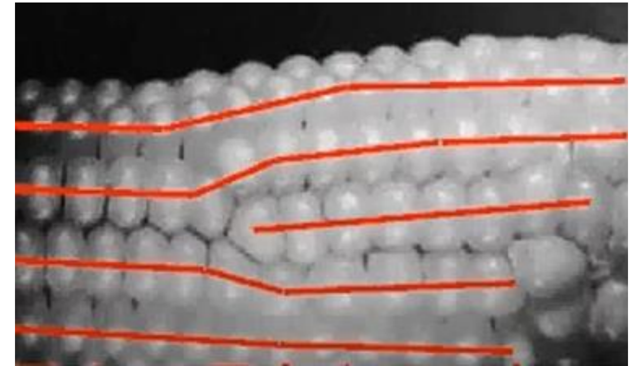
(b)

Figure 4.11

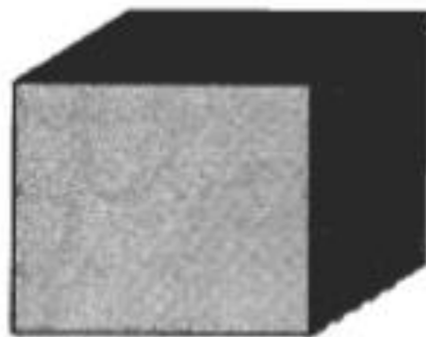
Definition of the Burgers vector, **b**, *relative to an edge dislocation. (a) In the perfect crystal, an m × n atomic step loop closes at the starting point. (b) In the region of a dislocation, the same loop does not close, and the closure vector* (**b**) *represents the magnitude of the structural defect. For the edge dislocation, the Burgers vector is* perpendicular *to the dislocation line.*

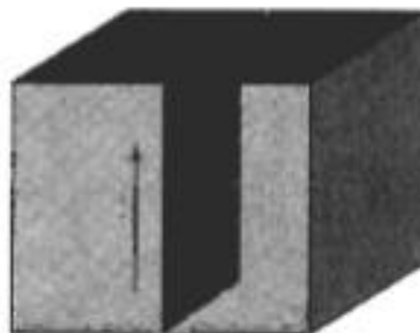


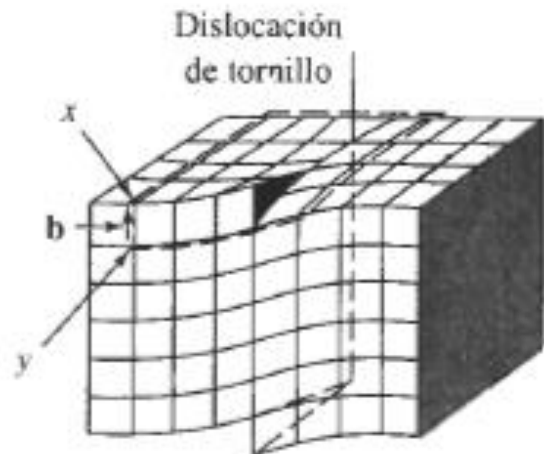
Dislocación de borde



Dislocación helicoidal





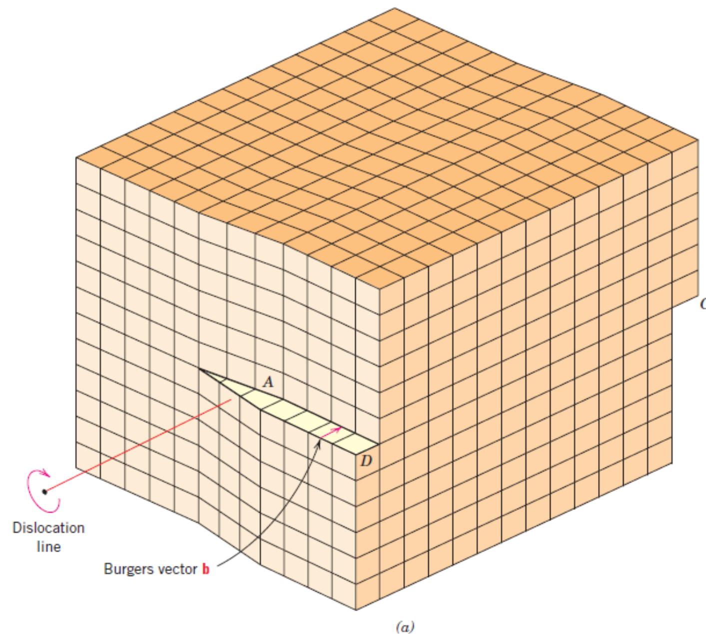


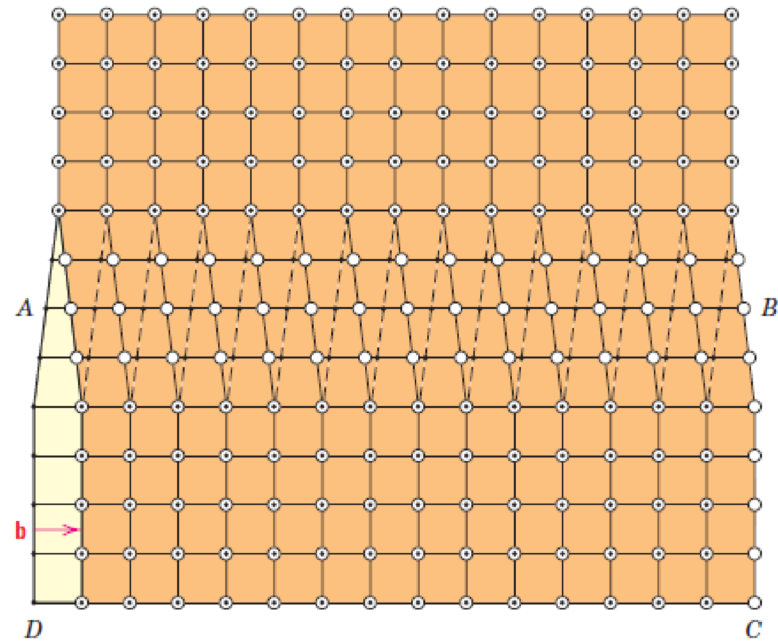
(a) (b) (c)

FIGURA 4-1 El cristal perfecto (a) es cortado y deformado una distancia igual a un espaciamient atómico, (b) y (c). La línea a lo largo de la cual ocurre este corte es una dislocación de tornillo. Se requiere de un vector de Burgers **b** para cerrar la trayectoria de espaciamientos atómicos alreded de la dislocación de tornillo.

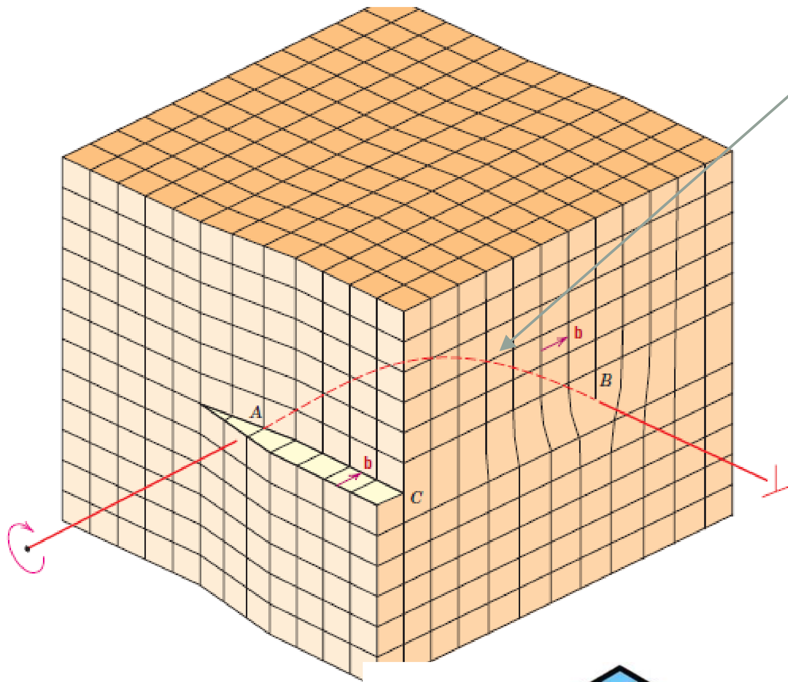
https://www.youtube.com/watch?v=7wFqpaV5wiM

- Se genera cuando se aplica un esfuerzo cizallante.
- El vector de Burgues es paralelo a la línea de dislocación.

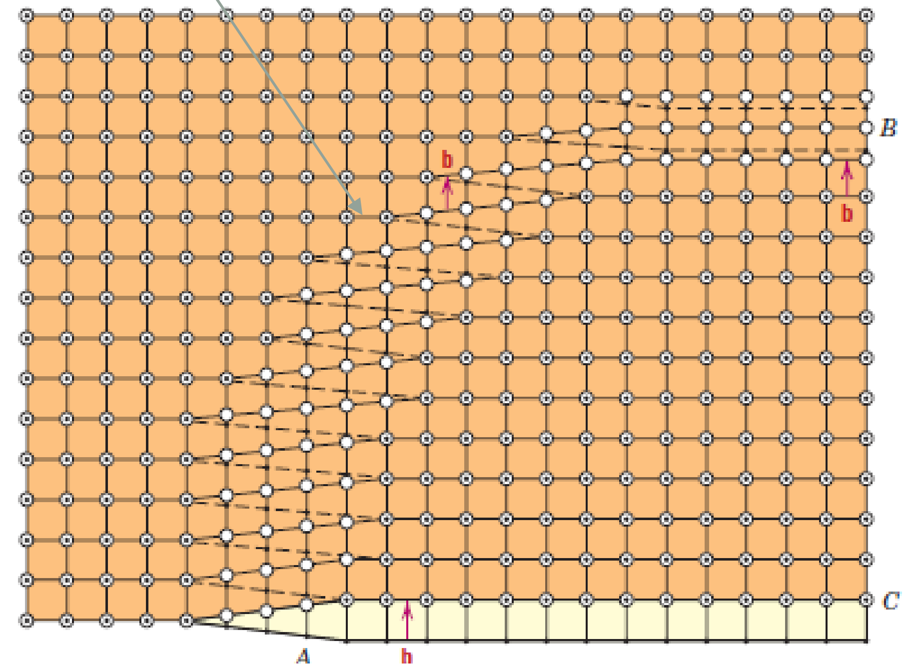


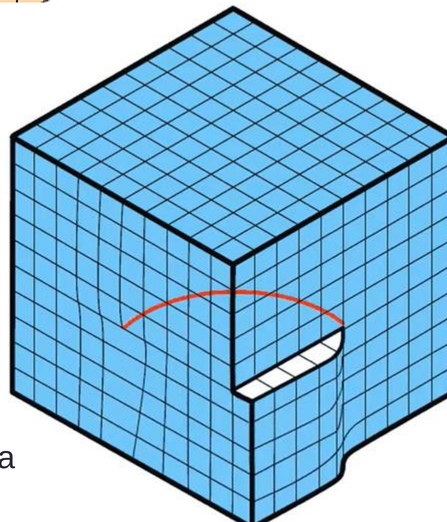


Dislocaciones Mixtas



El vector de Burgues no es paralelo, ni perpendicular a la línea de dislocación





El vector de Burgues formaría un ángulo entre 0 y 90°

DESLIZAMIENTO

Deformación plástica debido al movimiento de las dislocaciones

Se aplica una carga perpendicular a la línea de dislocación

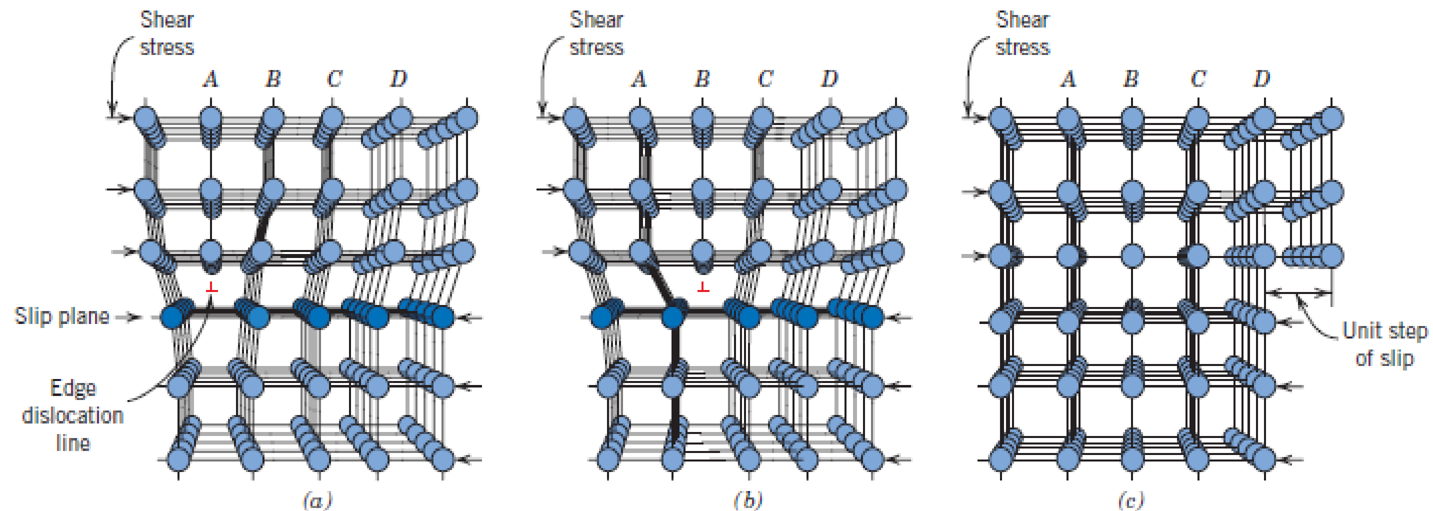
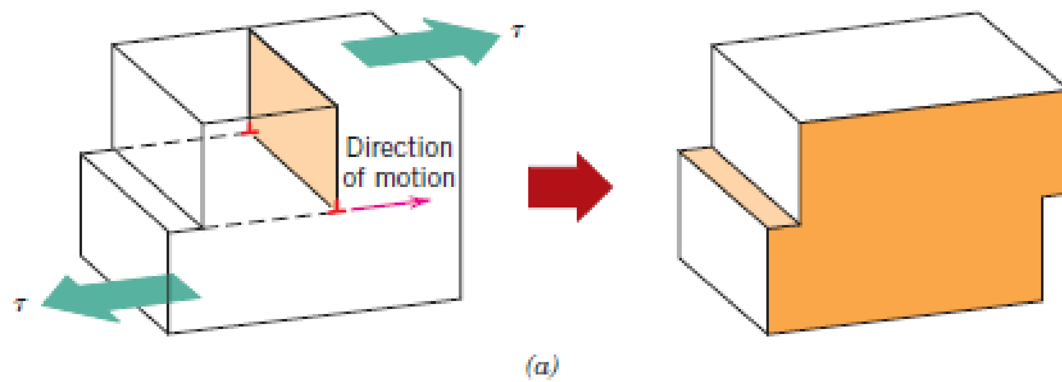
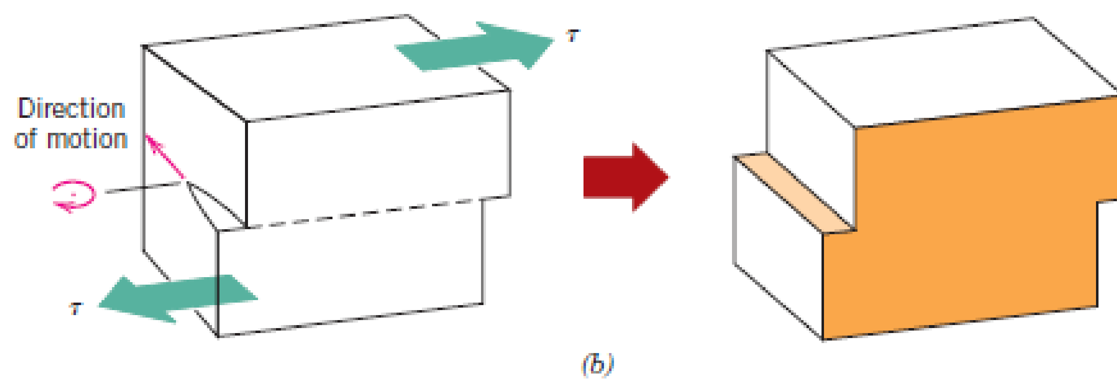


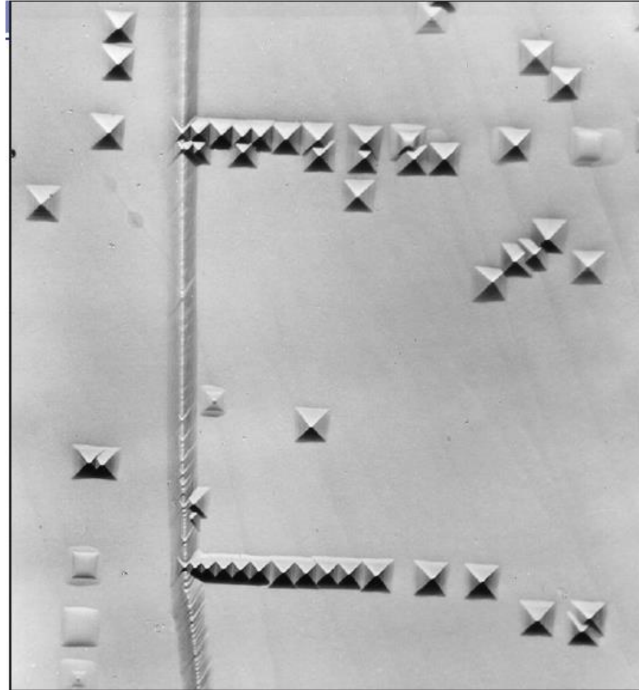
Figure 7.1 Atomic rearrangements that accompany the motion of an edge dislocation as it moves in response to an applied shear stress. (*a*) The extra half-plane of atoms is labeled *A*. (*b*) The dislocation moves one atomic distance to the right as *A* links up to the lower portion of plane *B*; in the process, the upper portion of *B* becomes the extra half-plane. (*c*) A step forms on the surface of the crystal as the extra half-plane exits. (Adapted from A. G. Guy, *Essentials of Materials Science*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1976, p. 153.)



(a)



(b)



Densidad: 10^3 mm^{-2} en metales cuidadosamente solidificados, en metales muy deformados 10^9 mm^{-2}, después de un tratamiento térmico 10^5 mm^{-2} en cerámicos 10^2 mm^{-2}

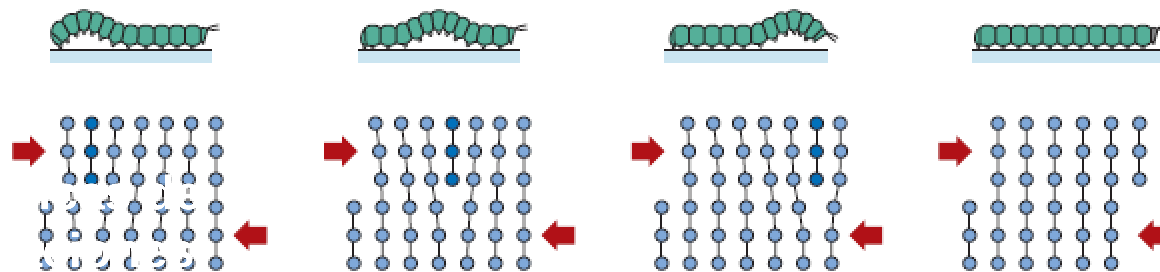


Figure 7.3 Representation of the analogy between caterpillar and dislocation motion.

$$\tau = c \exp(-kd/\mathbf{b}),$$

Esfuerzo para mover una dislocación de un lugar de equilibrio a otro, d es la distancia interplanar, b es la magnitud del vector Burguers

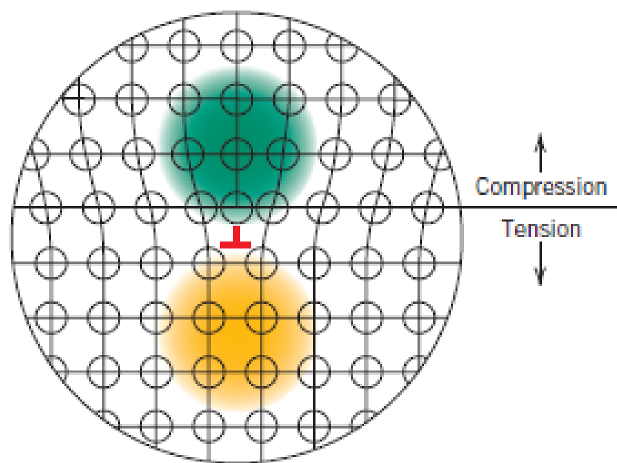
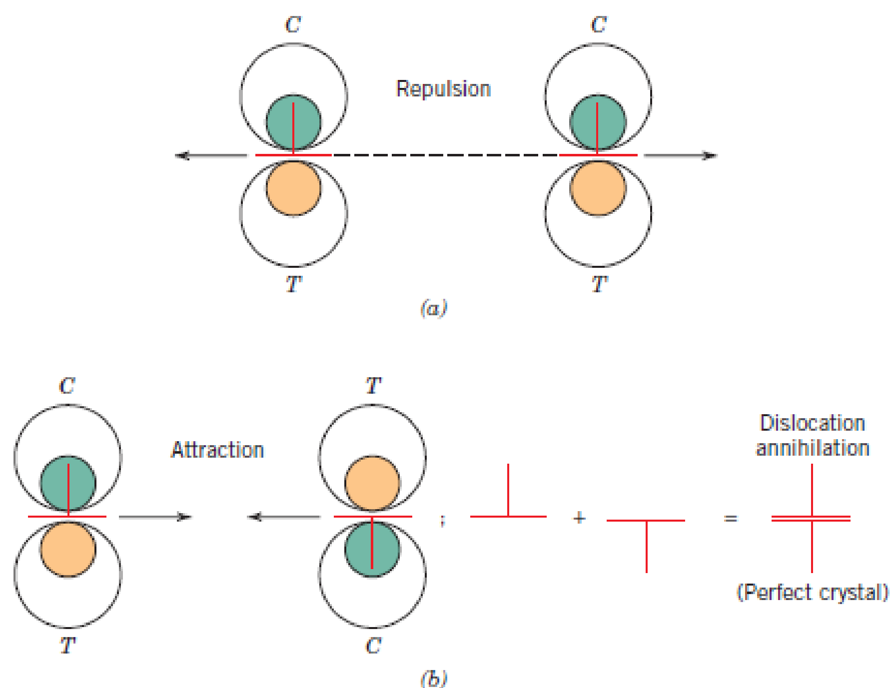
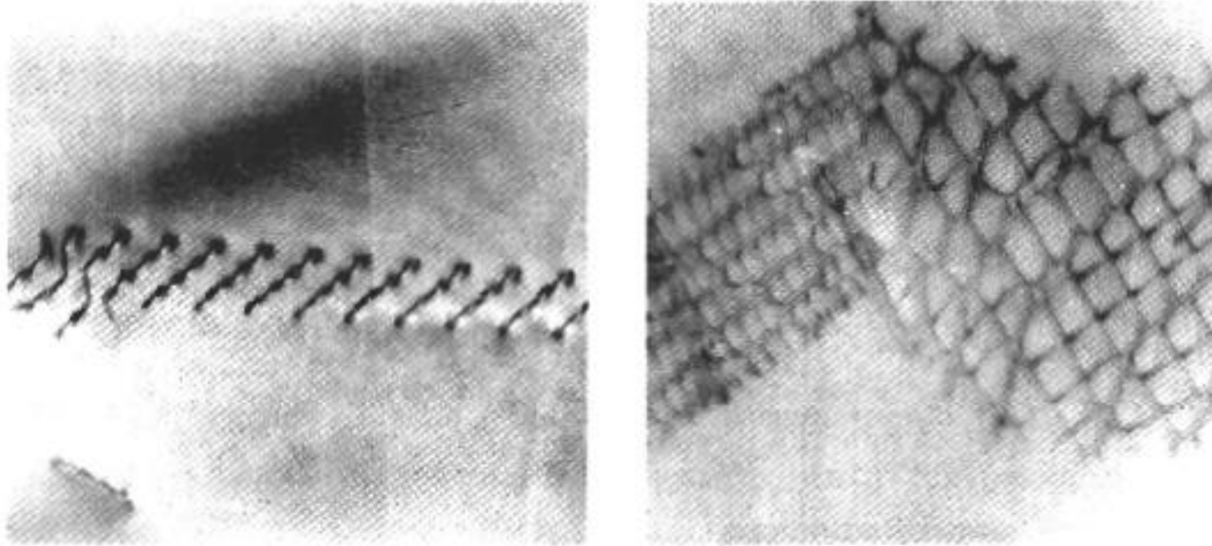


Figure 7.4 Regions of compression (green) and tension (yellow) located around an edge dislocation. (Adapted from W. G. Moffatt, G. W. Pearsall, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. I, *Structure*, p. 85. Copyright © 1964 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)

Figure 7.5 (*a*) Two edge dislocations of the same sign and lying on the same slip plane exert a repulsive force on each other; *C* and *T* denote compression and tensile regions, respectively. (*b*) Edge dislocations of opposite sign and lying on the same slip plane exert an attractive force on each other. Upon meeting, they annihilate each other and leave a region of perfect crystal. (Adapted from H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. III, *Mechanical Behavior*, p. 75. Copyright © 1965 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons.)

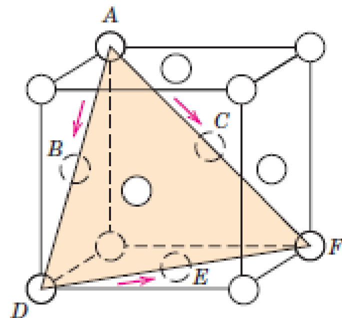




- Fotomicrografías electrónicas de dislocaciones en Ti, Al , a) apilamiento de dislocaciones , b) micrografía a 100x que muestran las líneas de deslizamiento y los limites de grano en el Al.

Sistemas de deslizamiento:

plano + dirección de deslizamiento



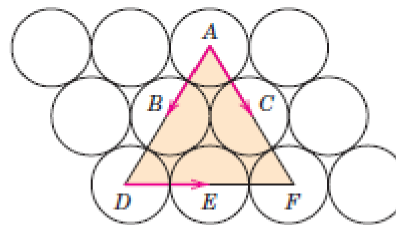
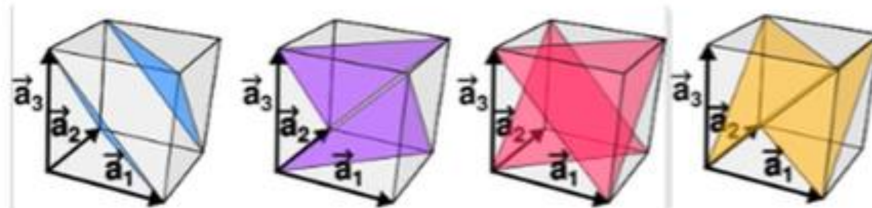


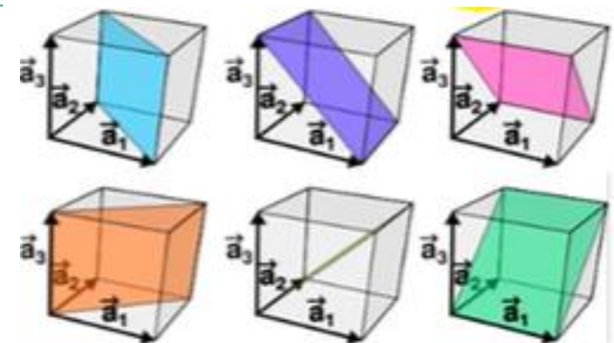
Figure 7.6 (*a*) A {111} ⟨110⟩ slip system shown within an FCC unit cell. (*b*) The (111) plane from (*a*) and three ⟨110⟩ slip directions (as indicated by arrows) within that plane comprise possible slip systems.



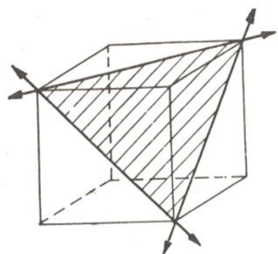
FCC: Se activan sistemas de deslizamiento secundarios mas rápidamente en la BCC, por ser mas compacta.

Table 7.1 Slip Systems for Face-Centered Cubic, Body-Centered Cubic, and Hexagonal Close-Packed Metals

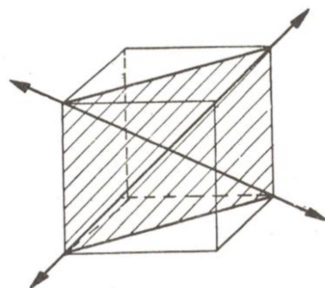
Metals	*Slip Plane*	*Slip Direction*	*Number of Slip Systems*
	Face-Centered Cubic		
Cu, Al, Ni, Ag, Au	{111}	$\langle 1\bar{1}0 \rangle$	12
	Body-Centered Cubic		
α-Fe, W, Mo	{110}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12
α-Fe, W	{211}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12
α-Fe, K	{321}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	24
	Hexagonal Close-Packed		
Cd, Zn, Mg, Ti, Be	{0001}	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3
Ti, Mg, Zr	$\{10\bar{1}0\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3
Ti, Mg	$\{10\bar{1}1\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	6



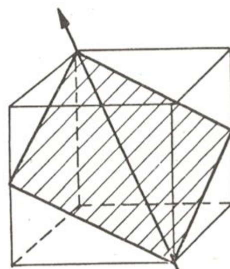
https://www.youtube.com/watch?v=123cxZwwKv8



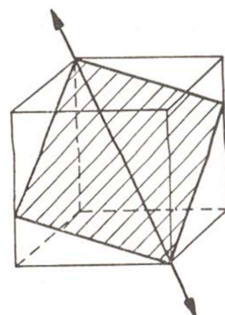
{110}

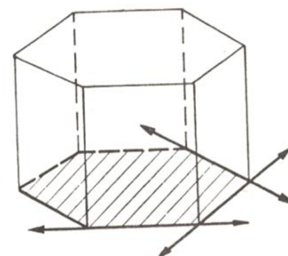


{112}

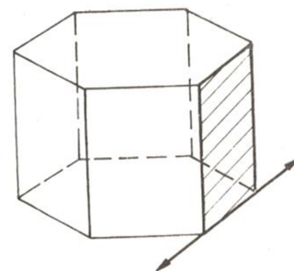


{123}

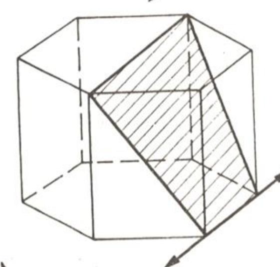




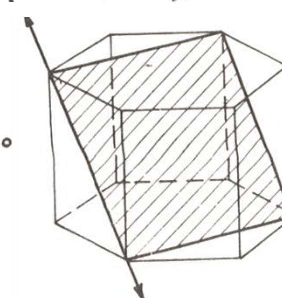
Basal



Prismático



Piramidal de 1ª especie

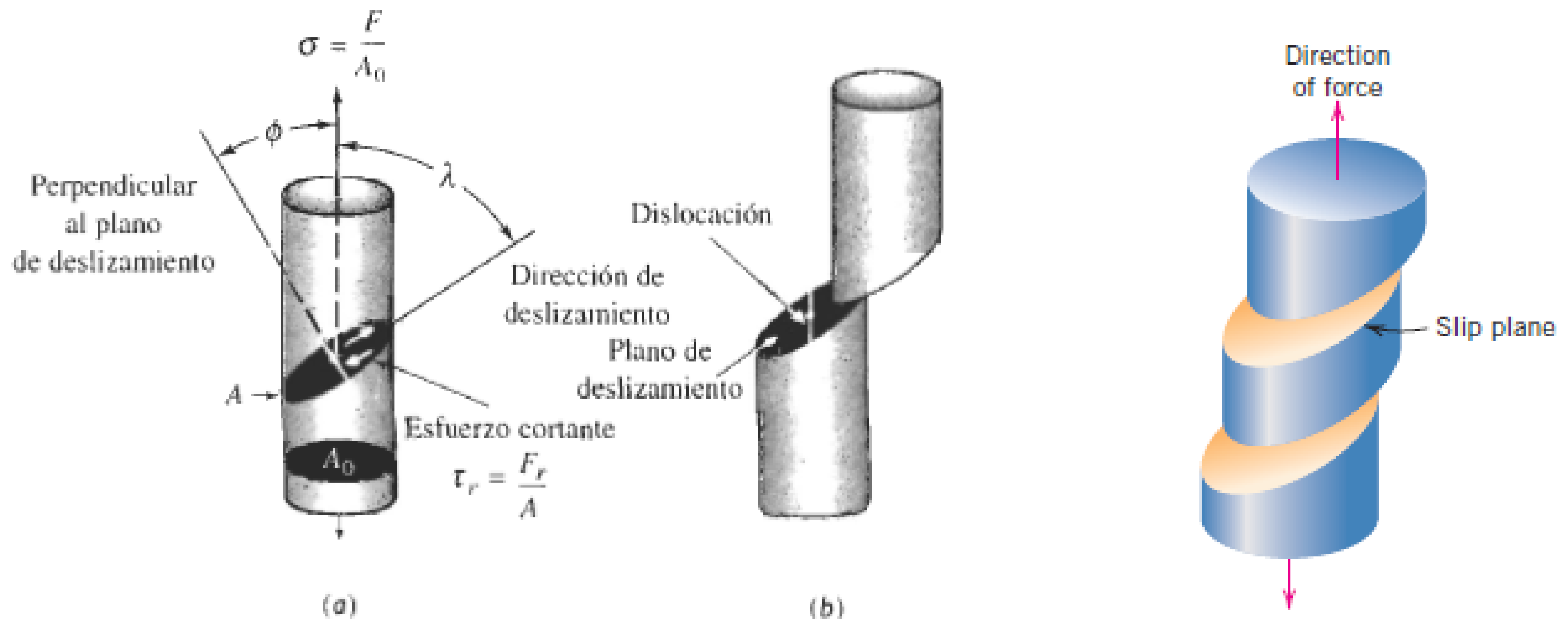


Piramidal de 2ª especie

DESLIZAMIENTO EN MONOCRISTALES

Las dislocaciones se mueven en respuesta a esfuerzos de corte, aplicados a lo largo de un plano de deslizamiento y en una dirección de deslizamiento.

La tensión de tracción σ induce sobre el plano PD en dirección DD una tensión de cortadura



La tensión de tracción σ induce sobre el plano de deslizamiento en una dirección de deslizamiento una tensión de cortadura

Esfuerzo de cizalladura resuelto

$$\tau_R = \sigma \cos\phi \cos\lambda$$

Esfuerzo de cizalladura resuelto critico o esfuerzo mínimo para iniciar deslizamiento.

$$\tau_R(\max) = \sigma(\cos\phi \cos\lambda)_{\max}$$

El límite elástico ocurrirá cuando τ alcance un valor crítico (esfuerzo de cizalladura resuelto critico τ_{crss}):

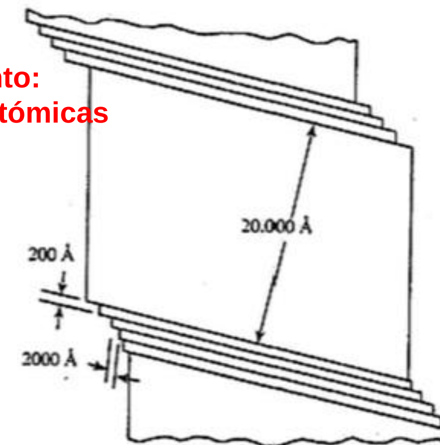
$$\sigma_y = \frac{\tau_{crss}}{(\cos\phi \cos\lambda)_{\max}}$$

El esfuerzo mínimo para generar fluencia se da cuando los ángulos tienen un valor de 45°

$$\sigma_y = 2\tau_{crss}$$



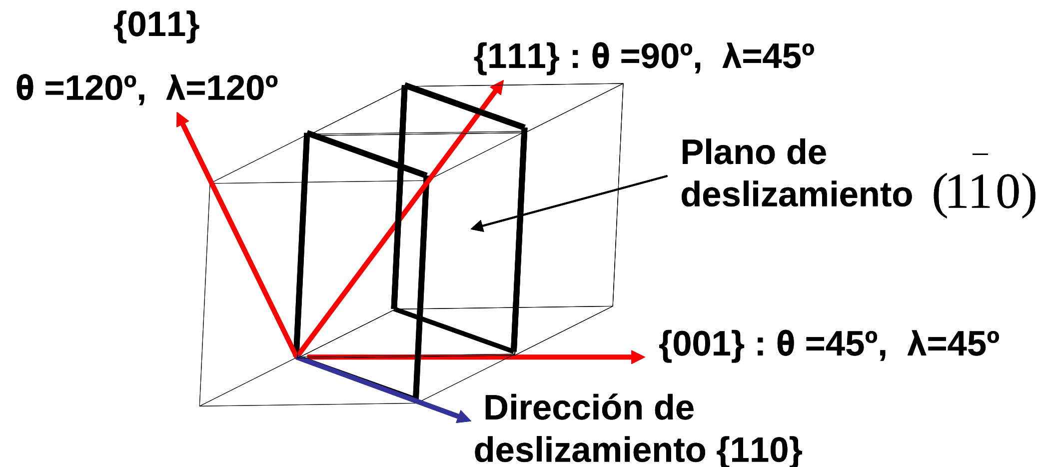
Líneas de deslizamiento:
Cerca de 100 capas atómicas



Ocurre deslizamiento en un sistema particular cuando la tensión de cortadura sobre el plano de deslizamiento, en la dirección de deslizamiento, alcanza un valor crítico.

https://www.youtube.com/watch?v=K43dqM_fSLY

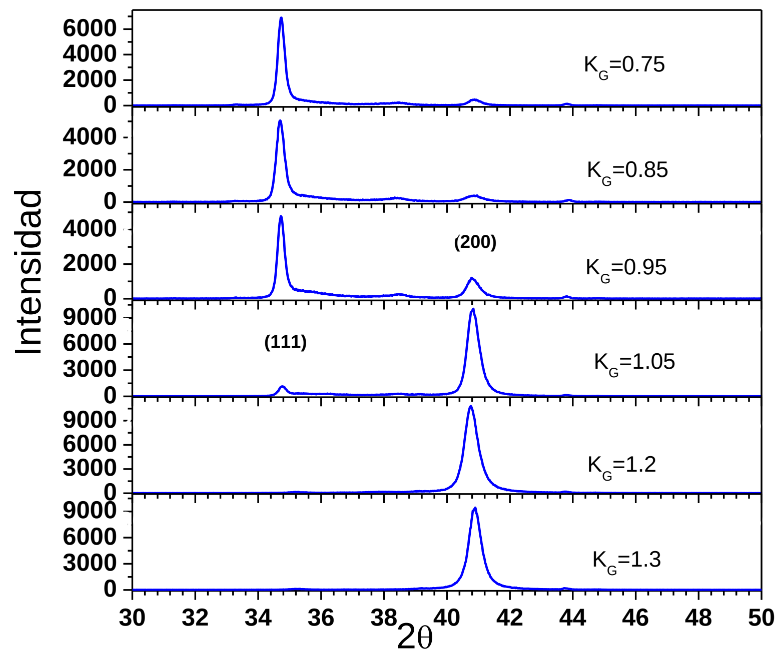
El deslizamiento más fácil se consigue cuando Φ y λ tienen un valor de 45º. Pero el deslizamiento no es probable cuando Φ ó λ tienen un valor de 90º



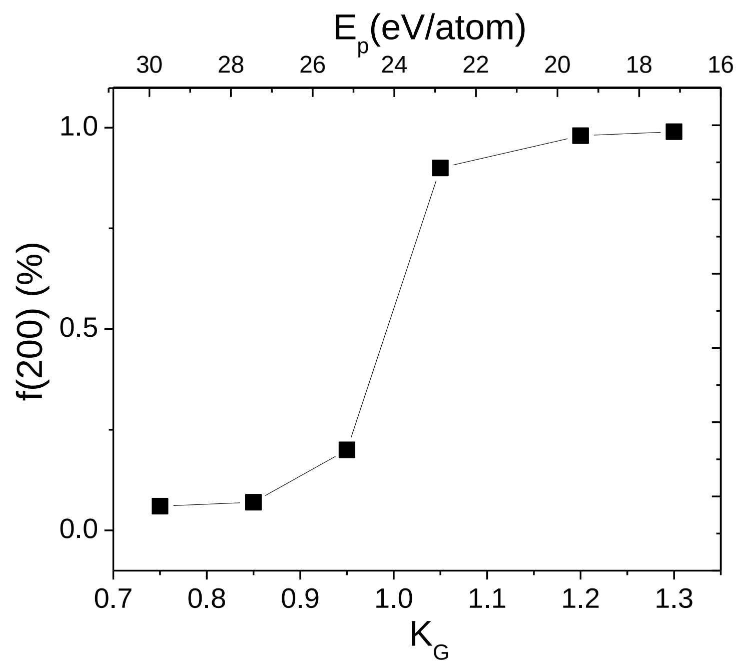
Representación esquemática del plano del sistema de deslizamiento (110){110} y las direcciones {111}, {011} y [001} para determinar los factores de Schmid en la fase FCC del NaCl.

El factor de Schmid es, m: cos φ cos λ

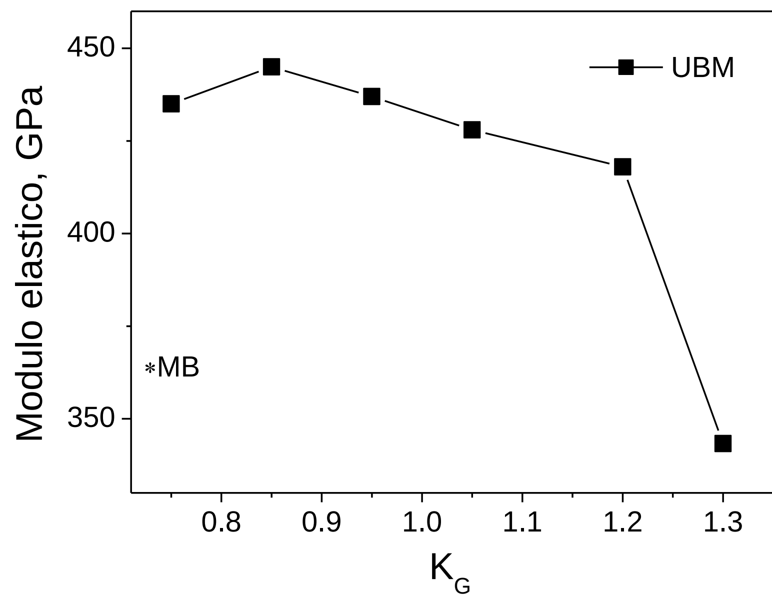
FCC tipo NaCl, se observó experimentalmente que su sistema de deslizamiento principal es {110}(110)[i], con los factores de Schmid: 0, 0.25 y 0.5 en las direcciones {111}, {011} y {001}, respectivamente



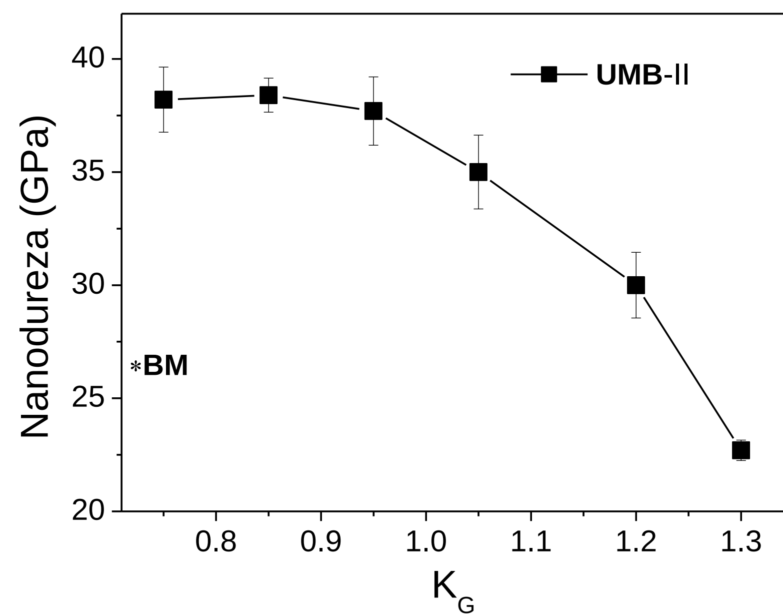
Intensidad
K_G=0.75
K_G=0.85
K_G=0.95
K_G=1.05
K_G=1.2
K_G=1.3
(200)
(111)
2θ



E_p(eV/atom)
f(200) (%)
K_G

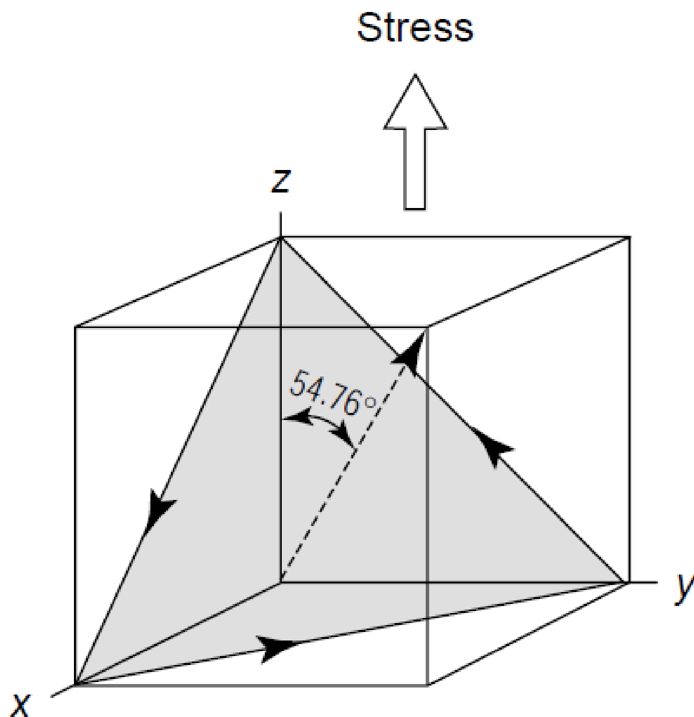


Modulo elastico, GPa
UBM
*MB
K_G



Nanodureza (GPa)
UMB-II
*BM
K_G

A single crystal of an FCC metal is oriented so that the [001] direction is parallel to an applied stress of 5000 psi. Calculate the resolved shear stress acting on the (111) slip plane in the [-110], [0-11], and [10-1] slip directions. Which slip system(s) will become active first?,



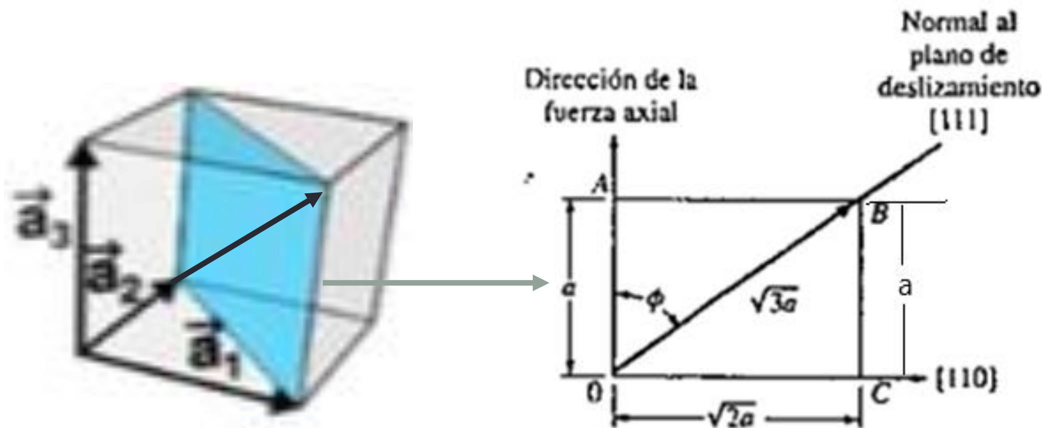
$\phi = 54.76°$ $\tau = 5000 \cos 54.76 \cos \lambda$

$\lambda_{110} = 90°$ $\tau = 0$

$\lambda_{011} = 45°$ $\tau = 2{,}040$ psi active

$\lambda_{101} = 45°$ $\tau = 2{,}040$ psi active

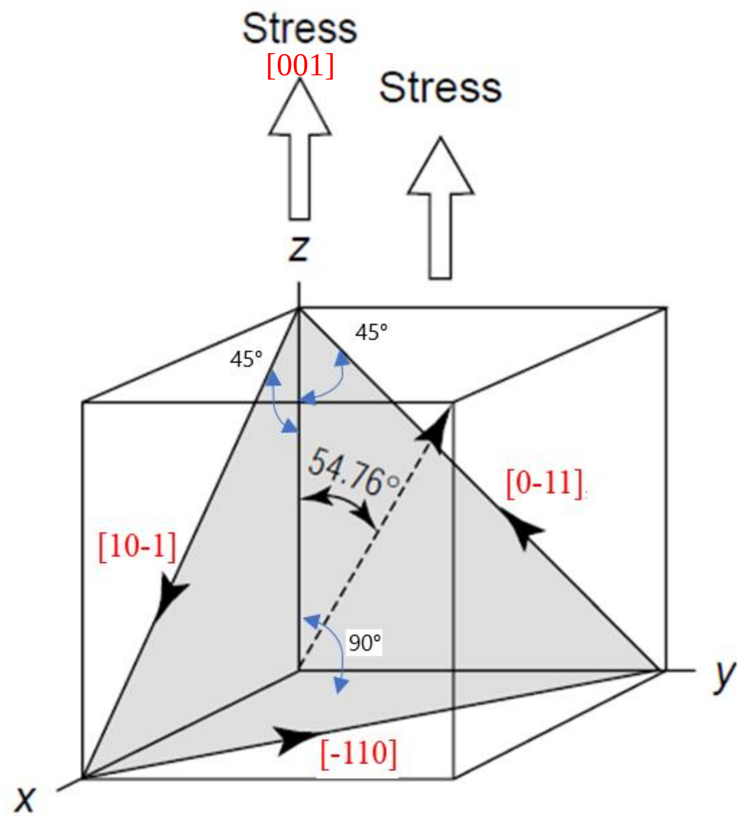
Ángulo entre la normal al plano de deslizamiento:



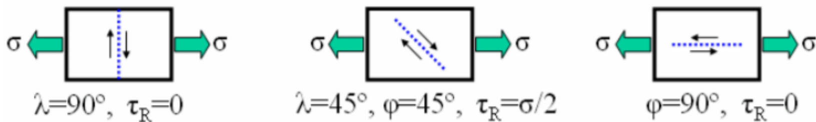
$$\tan\alpha = \frac{a}{a\sqrt{2}} \qquad \alpha = 35.24°$$

$$\cos\phi = \frac{a}{\sqrt{3}a} = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad \text{o} \quad \phi = 54{,}74°$$

Ángulo entre la dirección de deslizamiento:



$$\tau_{CRSS} = \sigma_y(\cos\lambda - \cos\phi)_{(max)} \quad \text{........(3.4)}$$



$$\phi = 54.76° \qquad \tau = 5000 \cos 54.76 \cos\lambda$$

$$\lambda_{110} = 90° \qquad \tau = 0$$

$$\lambda_{011} = 45° \qquad \tau = 2{,}040 \text{ psi active}$$

$$\lambda_{101} = 45° \qquad \tau = 2{,}040 \text{ psi active}$$

tp://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m8/Apuntes_Tecnologia_Materiales.pdf

Análisis de Resultados

Esfuerzo de cizalladura resuelto

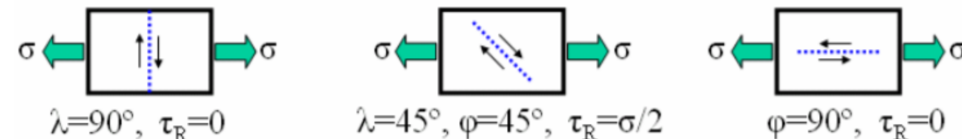
$$\tau_R = \sigma \cos\phi \cos\lambda$$

Si un ángulo es 0, entonces no desarrolla ningún esfuerzo cortante a lo largo de la dirección de deslizamiento y la dislocación no se mueve. El valor del esfuerzo σ aplicado puede ser alto, sin embargo no se generara un esfuerzo cortante.

Esfuerzo de cizalladura resuelto critico

Es el esfuerzo cortante que se requiere para que ocurra el deslizamiento. Es decir, la deformación plástica inicia cuando el esfuerzo aplicado **σ** produce el esfuerzo cortate resuelto es igual al esfuerzo cortante resuelto critico. Recuerde que el deslizamiento inicia por el sistema de deslizamiento que este mejor orientado al esfuerzo de cizalladura resultante.

$$\tau_{CRSS} = \sigma_y (\cos\lambda - \cos\phi)_{(max)} \quad \text{........(3.4)}$$



El factor de Schmid es M: cos φ cos λ

La actuación de un sistema de deslizamiento es mas probable cuando actúa mayor sea la tensión de cizalladura resuelta, es decir entre mayor es el factor de Schmid se favorece el deslizamiento.

Ley de Schmid: **$T_R = T_{CRSS}$ Inicia la fluencia.**

$$\sigma_y = \frac{\tau_{crss}}{(\cos\phi\cos\lambda)_{max}}$$

Mínimo valor del módulo elástico:

$$\sigma_y = 2\tau_{crss}$$

El esfuerzo mínimo necesario para que se inicie la fluencia (módulo elástico) se da cuando M tiene un máximo valor de 0.5. Esto se puede dar a la relación de los dos ángulos. Puede verificarse para el caso de en que las 3 direcciones sean coplanares:

$$\lambda + \phi = 90° \rightarrow M = \cos\lambda \cos(\tfrac{\pi}{2} - \lambda) = \tfrac{1}{2} sen(2\lambda) \leq \tfrac{1}{2}$$

$$\phi = 54.76° \qquad \tau = 5000 \cos 54.76 \cos\lambda$$

$$\lambda_{110} = 90° \qquad \tau = 0$$

$$\lambda_{011} = 45° \qquad \tau = 2{,}040 \text{ psi active}$$

$$\lambda_{101} = 45° \qquad \tau = 2{,}040 \text{ psi active}$$

http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m8/Apuntes_Tecnologia_Materiales.pdf

DEFORMACIÓN PLÁSTICA

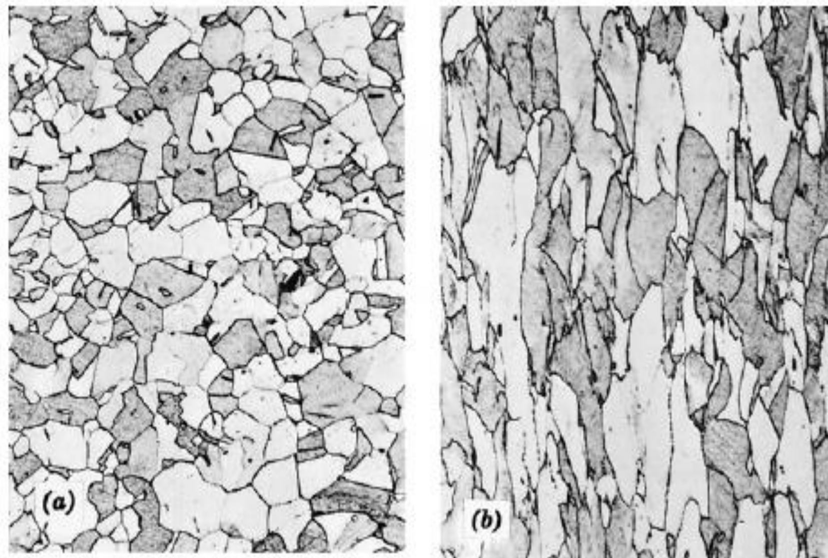


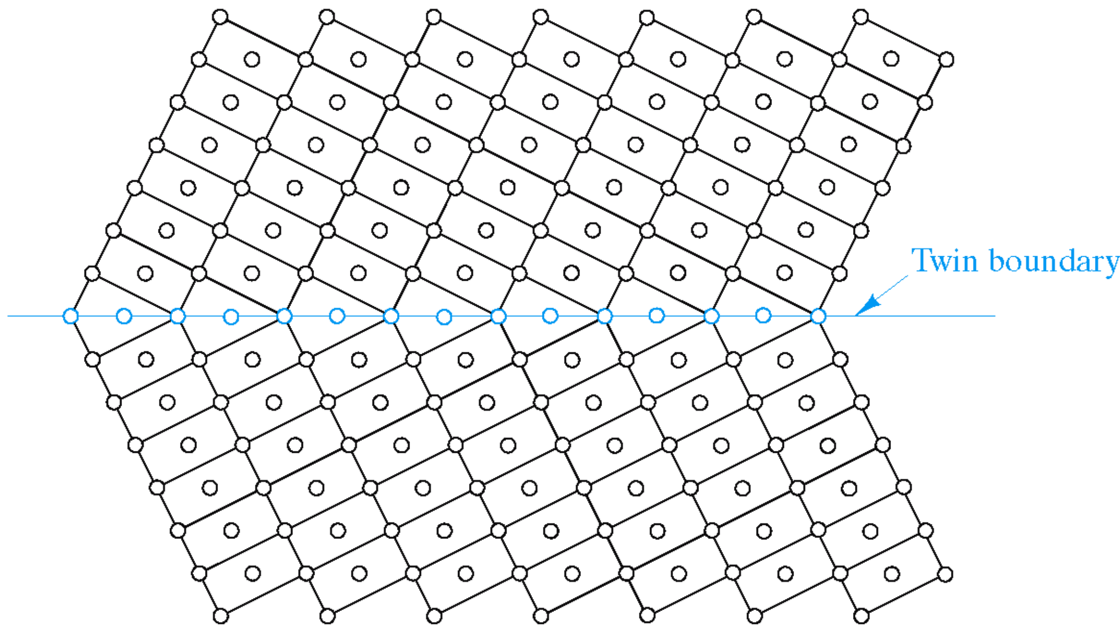
Figure 7.11 Alteration of the grain structure of a polycrystalline metal as a result of plastic deformation. (*a*) Before deformation the grains are equiaxed. (*b*) The deformation has produced elongated grains. 170×. (From W. G. Moffatt, G. W. Pearsall, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials,* Vol. I, *Structure,* p. 140. Copyright © 1964 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)

Líneas de deslizamiento en granos de Cu.



Figure 7.10 Slip lines on the surface of a polycrystalline specimen of copper that was polished and subsequently deformed. 173×. [Photomicrograph courtesy of C. Brady, National Bureau of Standards (now the National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD).]

DEFORMACIÓN POR MACLADO (SUPERFICIAL)



Hay una separación de dos regiones cristalinas, que son similares. Se generan en procesos de deformación y recocido.

Los límites de macla aumentan la resistencia del material.

El movimiento de los límites de macla pueden causar deformación en el material.

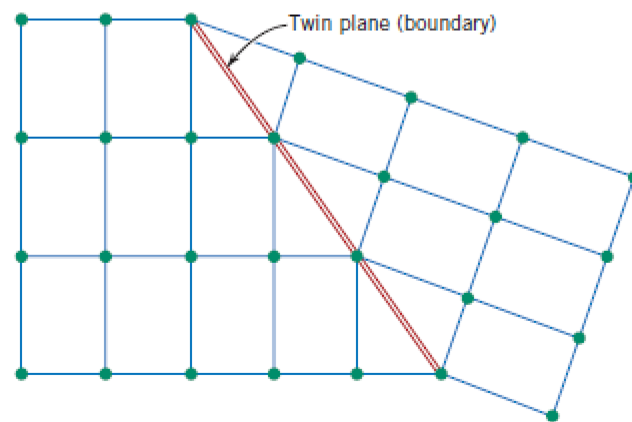
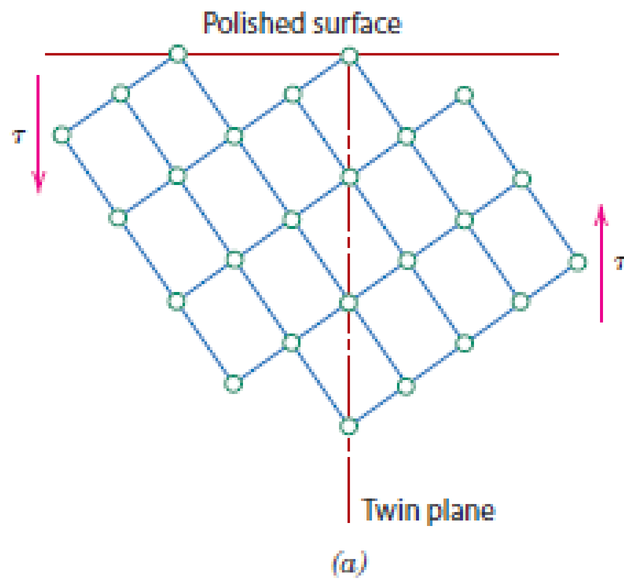
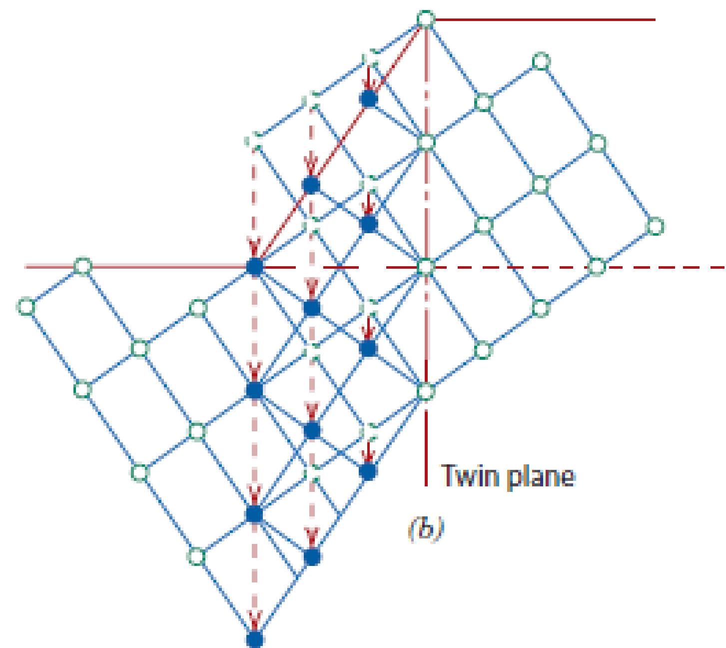


Figure 4.9 Schematic diagram showing a twin plane or boundary and the adjacent atom positions (colored circles).





El maclado se genera en un plano cristalino definido y en una dirección específica. En BCC se da en (122) y [111].

Generalmente se da en BCC y HCP, a temperaturas bajas y a elevadas tasas de carga, ej. Impacto.

La reorientación en la zona maclada puede generar nuevos sistemas de deslizamiento que facilitan el proceso de deformación por deslizamiento.

Deformación por deslizamiento vs por maclado.
En la macla hay una reorientación cristalina.
El desplazamiento atómico es menor que la separación interatómica.

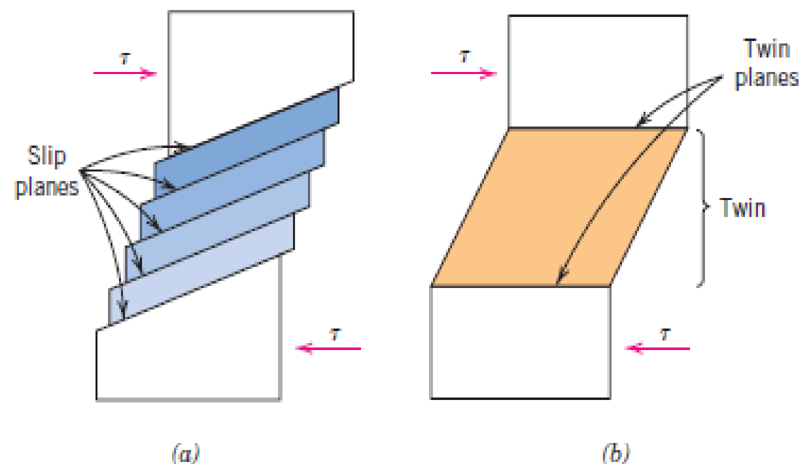
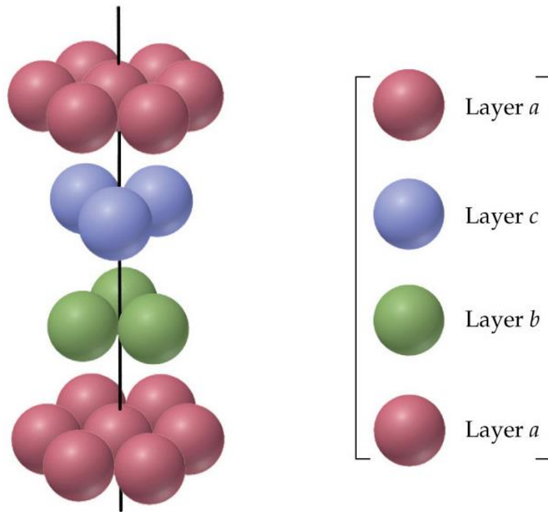
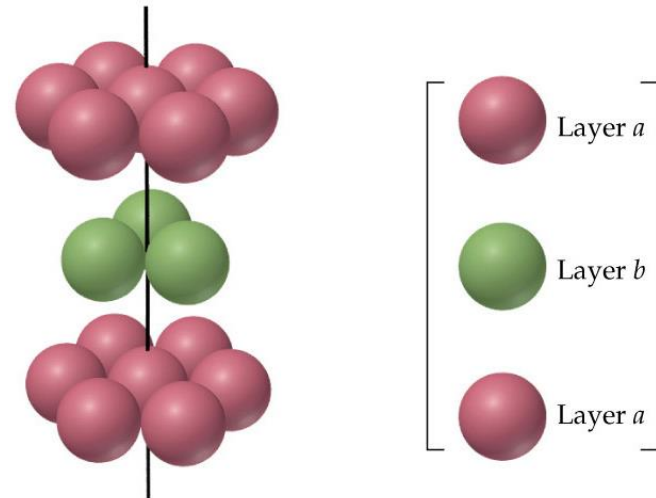
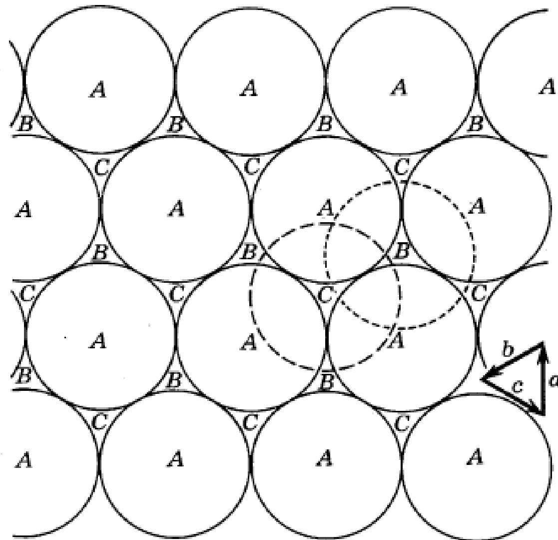


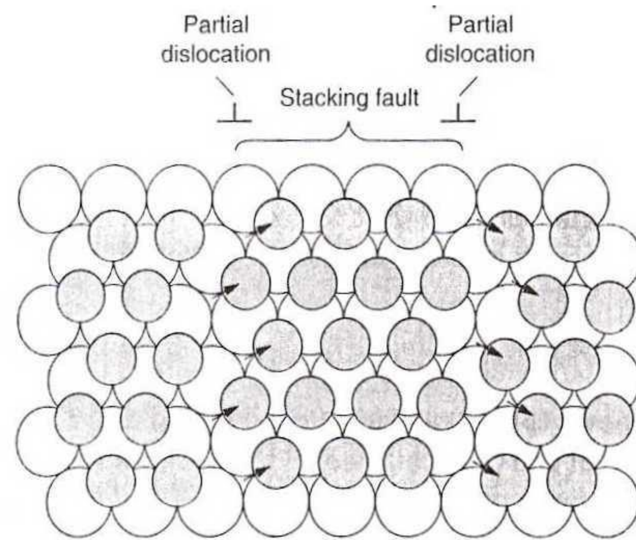
Figure 7.13 For a single crystal subjected to a shear stress τ, (*a*) deformation by slip; (*b*) deformation by twinning.

FALLAS DE APILAMIENTO

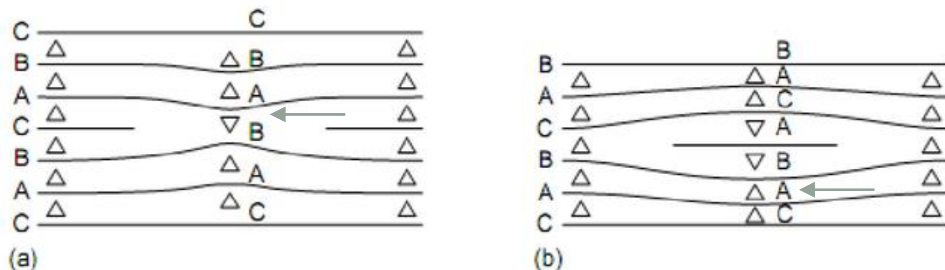




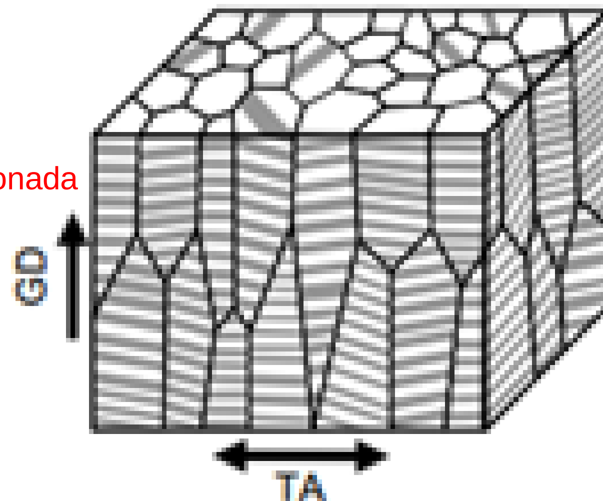


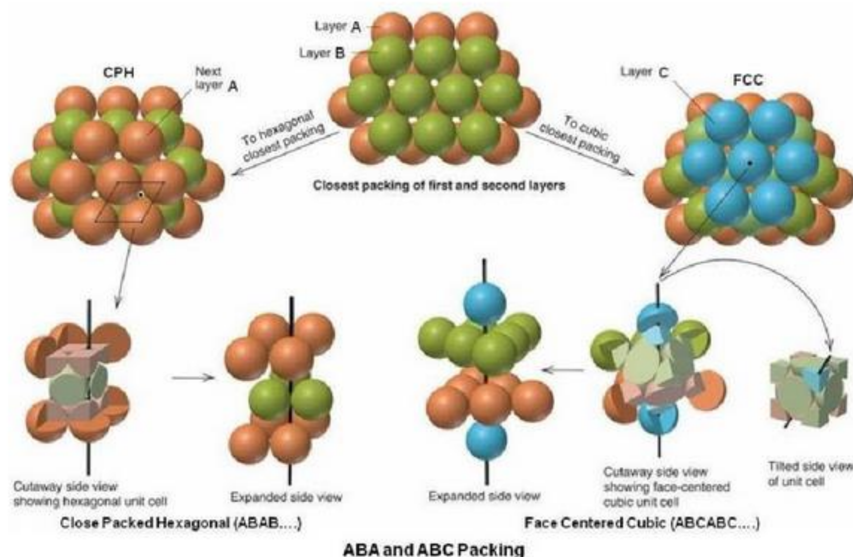


NANOTWINS (SPUTTERING)



Intrínseco: La capa C fue removida / **Extrínseco**: Una capa A extra es adicionada



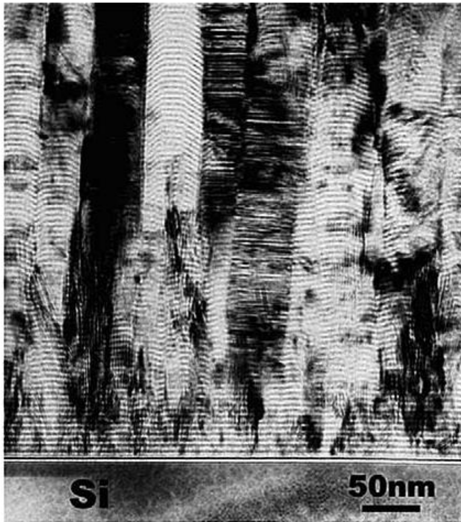


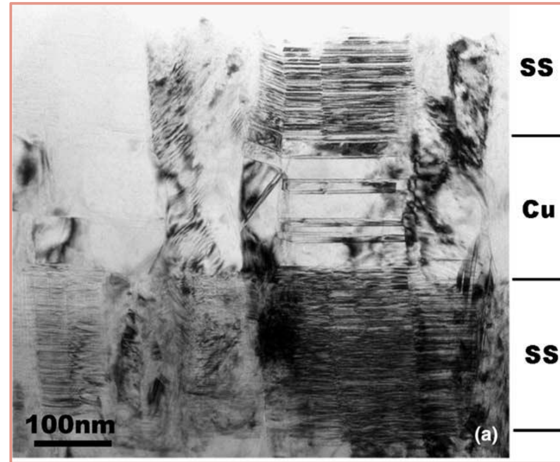
Intrínseco: La capa C fue removida / **Extrínseco**: Una capa A extra es adicionada

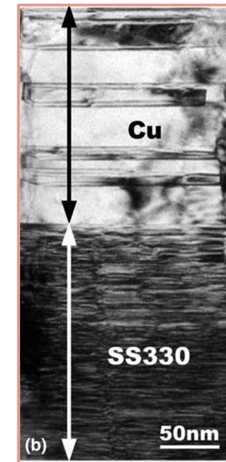
Sample	d (μm)	λ (nm)	σ_y (MPa)	σ_{uts} (MPa)	H_c	δ_u (%)	δ_f (%)
A	3.0	38	443 ± 16	462 ± 8	1.04	1.4 ± 0.2	5.5 ± 0.3
B	4.3	42	398 ± 8	424 ± 6	1.06	5.6 ± 0.8	10.4 ± 1.7
C	4.3	74	342 ± 12	372 ± 4	1.09	8.5 ± 0.6	15.5 ± 0.5
D	18.6	71	230 ± 3	269 ± 3	1.17	20.2 ± 0.5	31.6 ± 1.5
	0.5	30	481	550	1.14	0.6	17
	0.7	42	434	480	1.11	0.6	21
	0.55	45	535	535	1	0.9	7
	0.043	4.5	1100	1200	1.09	2	2

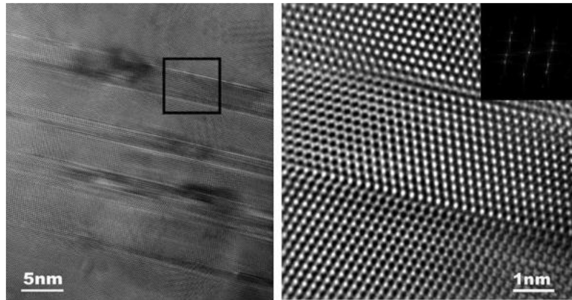
d, average grain size; λ, average twin thickness; σ_y, 0.2% offset yield strength; σ_{uts}, ultimate tensile strength; $H_c = \sigma_{uts}/\sigma_y$, strain hardening capacity; δ_u, uniform strain; δ_f, strain to elongation.

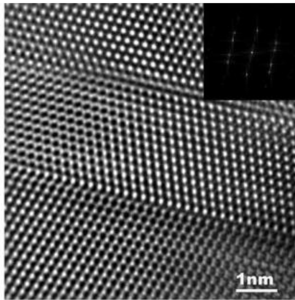
multicapa Cu/330 SS.

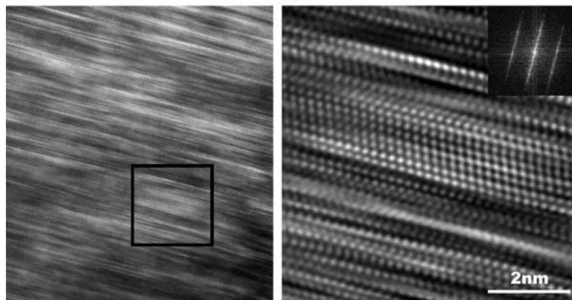


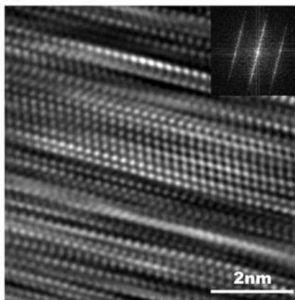


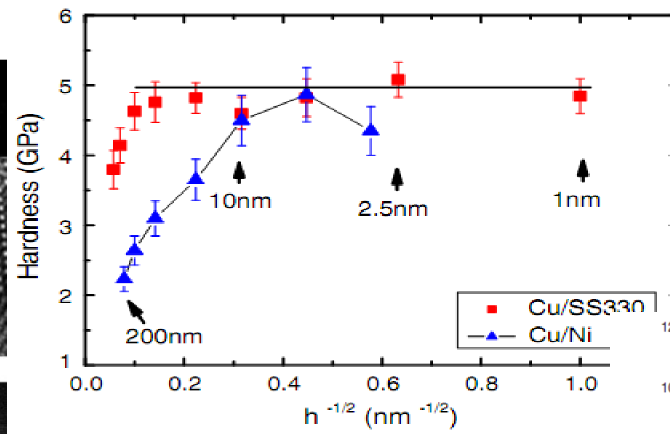


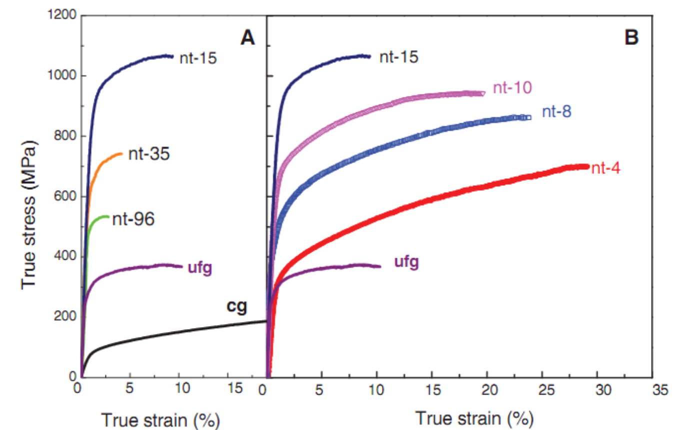








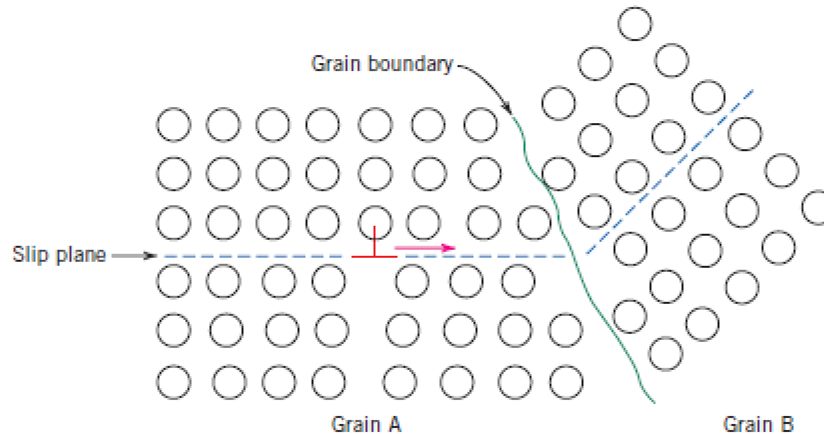


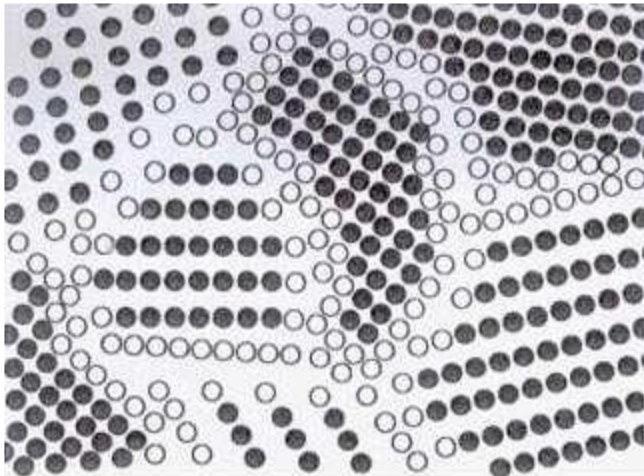


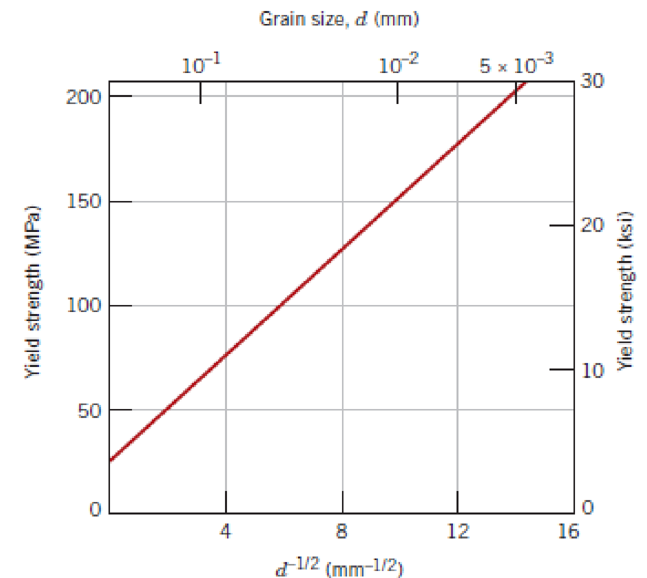
ENDURECIMIENTO:

Reducir el movimiento de las dislocaciones

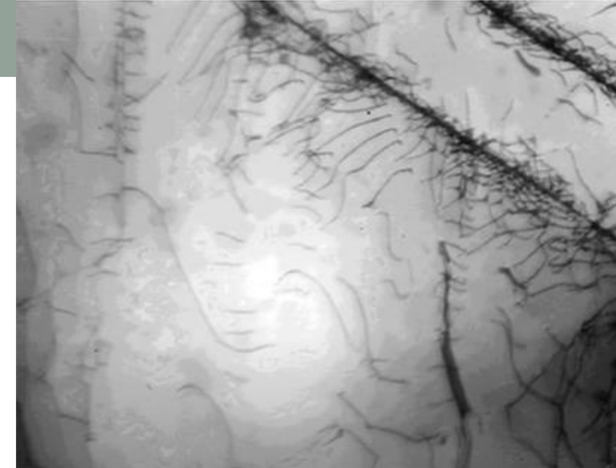
El límite de grano actúa como barrera al movimiento de las dislocaciones; cambio de dirección de movimiento.





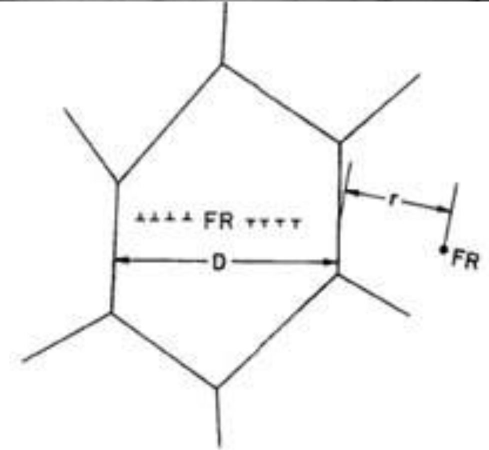


Teoría de Cottrell: Apilamiento de dislocaciones dentro del grano para atravesar el límite de grano.



Se cumple para apilamientos para > 50 dislocaciones

Efecto Hall Petch ⇨ $$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$$

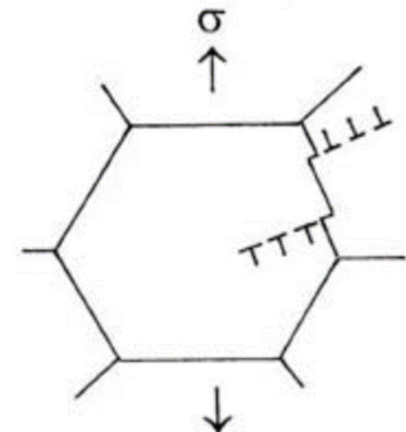


σ_y es el límite elástico, nivel de esfuerzo necesario para ocasionar una cierta cantidad de deformación permanente. σ_o y K son constantes relacionadas con la **resistencia del grano y un factor de liberación de dislocaciones**:

σ_o esta relacionado con la tensión de fricción que se opone al movimiento de las dislocaciones.

K se asocia con la medida de la extensión de apilamiento de dislocaciones frente a una barrera.

$$Hy = Ho + KD^{1/2}$$



Teoría de J. C. M. Li, los bordes de grano son fuentes de dislocaciones y el esfuerzo de fluencia esta asociado con la actividad de estas fuentes de dislocaciones

https://www.youtube.com/watch?v=3ZKCC8Z11J4

A copper-zinc alloy has the following properties:

grain diameter (mm)	strength (MPa)	$d^{-1/2}$
0.015	170 MPa	8.165
0.025	158 MPa	6.325
0.035	151 MPa	5.345
0.050	145 MPa	4.472

Determine (a) the constants in the Hall-Petch equation and (b) the grain size required to obtain a strength of 200 MPa.

The values of $d^{-1/2}$ are included in the table; the graph shows the relationship. We can determine K and σ_o either from the graph or by using two of the data points.

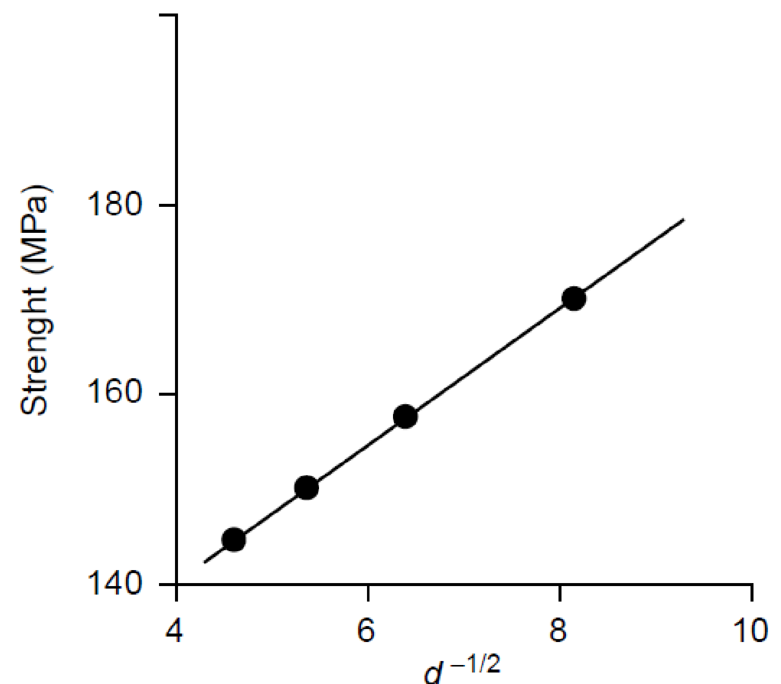
(a) $170 = \sigma_o + K(8.165)$

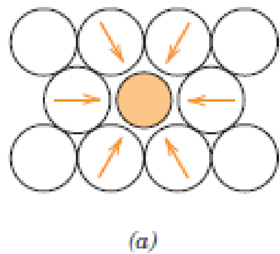
$$\frac{145 = \sigma_o + K(4.472)}{25 = 3.693K}$$

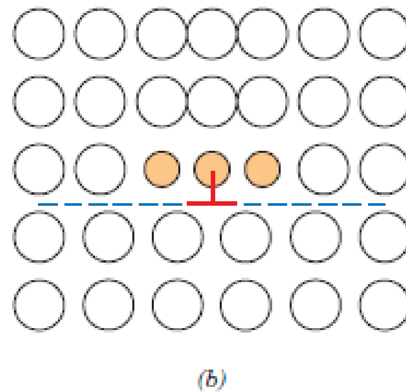
$K = 6.77\ \text{MPa}/\sqrt{\text{mm}} \qquad \sigma_o = 114.7\ \text{MPa}$

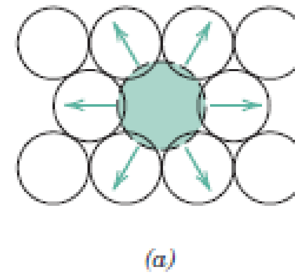
(b) To obtain a strength of 200 MPa:

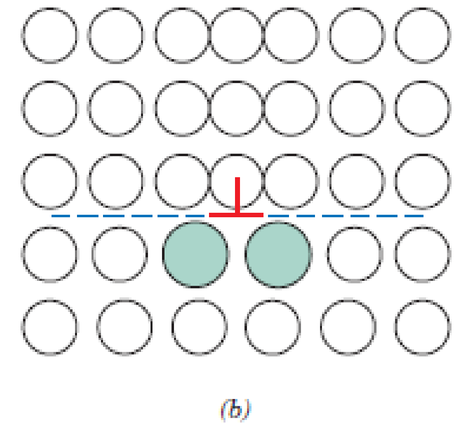
$$200 = 114.7 + 6.77/\sqrt{d}$$
$$85.3 = 6.77/\sqrt{d}$$
$$d = 0.0063\ \text{mm}$$



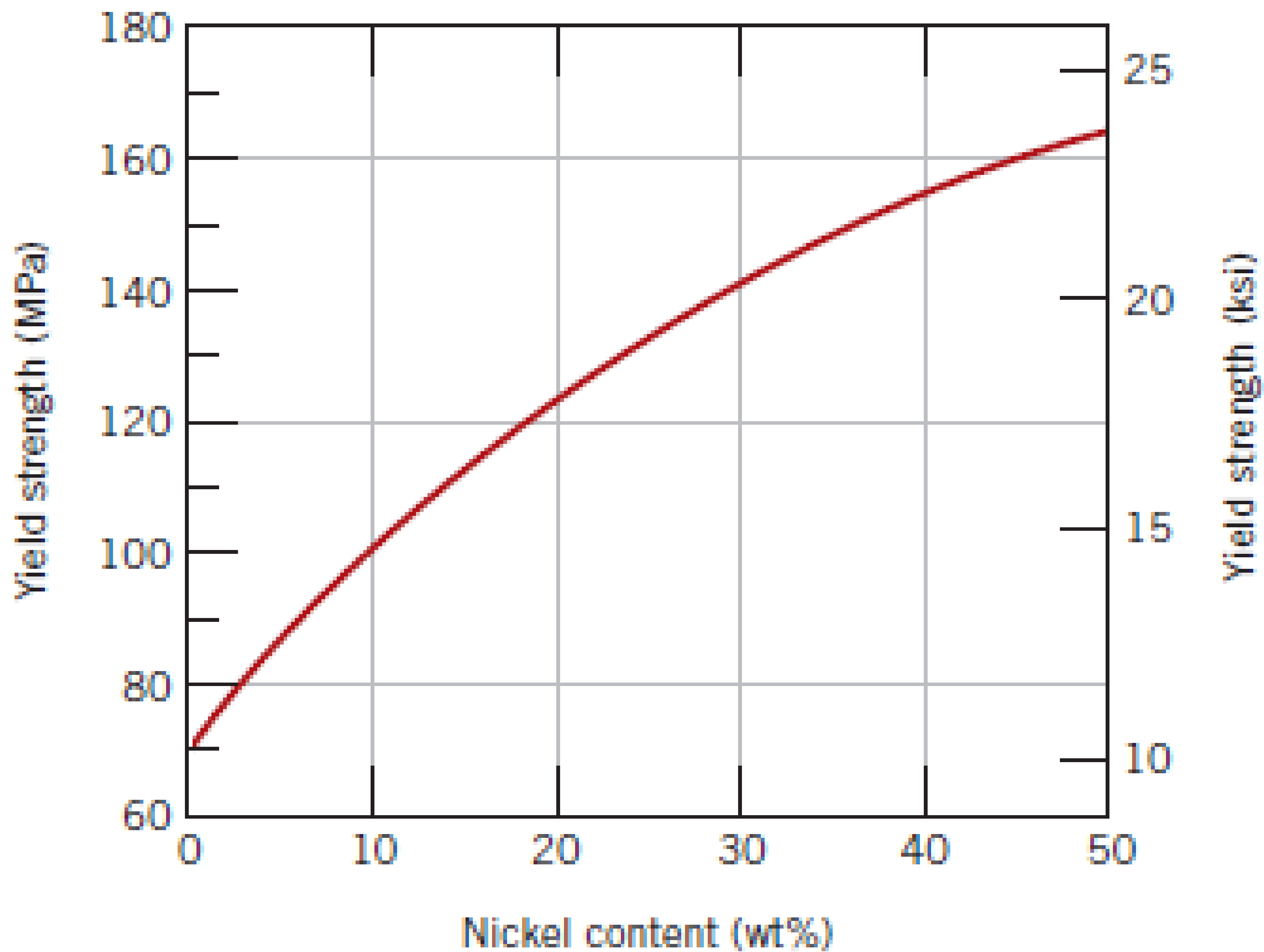








La interacción entre la deformación en los átomos vecinos del disolvente y el campo de deformación de Las dislocaciones disminuye el movimiento de las dislocaciones. -Se aumenta la deformación total cuando se separa las impurezas de la dislocación.

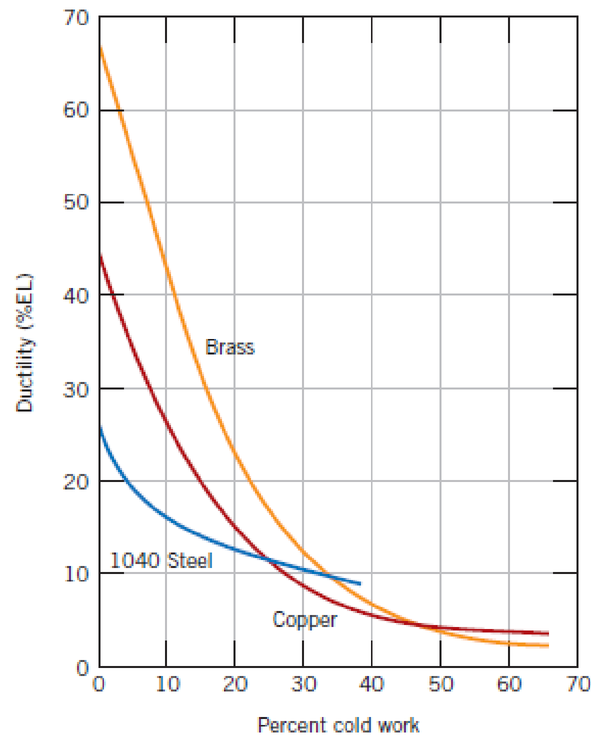

180
160
140
120
100
80
60
Yield strength (MPa)
25
20
15
10
Yield strength (ksi)
0
10
20
30
40
50
Nickel content (wt%)

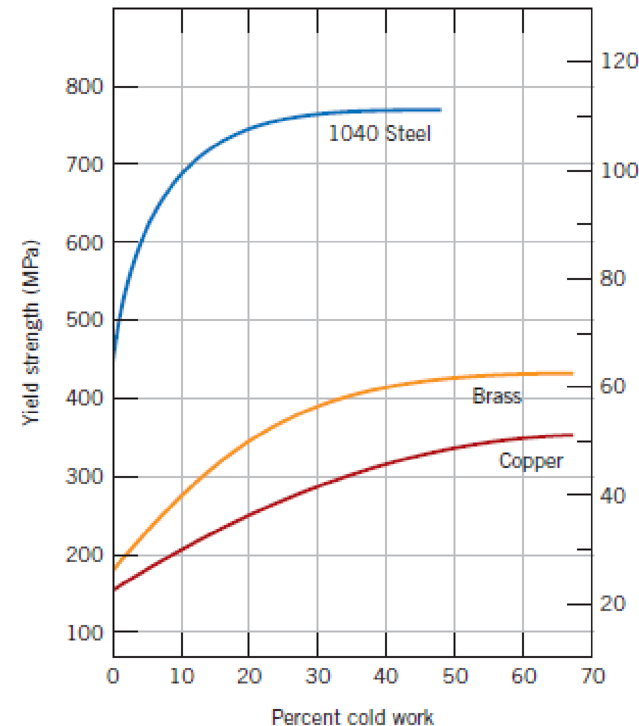
Endurecimiento por deformación:

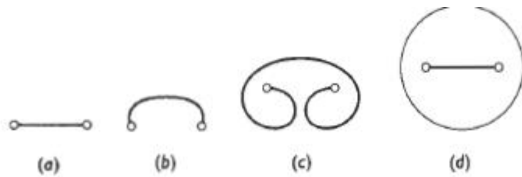
proceso a temperatura ambiente

$$\%\,CW = \left(\frac{A_0 - A_d}{A_0}\right) \times 100$$

Con el aumento de la deformación hay un aumento de las dislocaciones.
Se disminuye la distancia de separación entre dislocaciones.
Se generan interacciones de los campos de deformación en las dislocaciones y se repelan entre ellas. Se disminuye el movimiento de las dislocaciones por la presencia de otras dislocaciones.







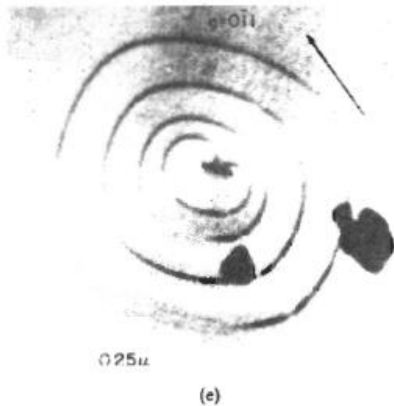
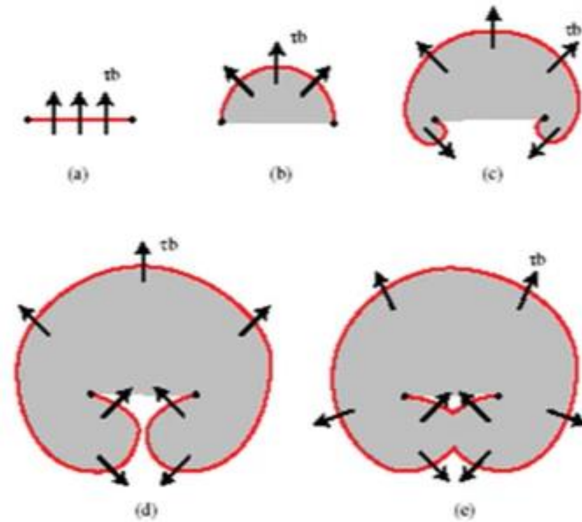
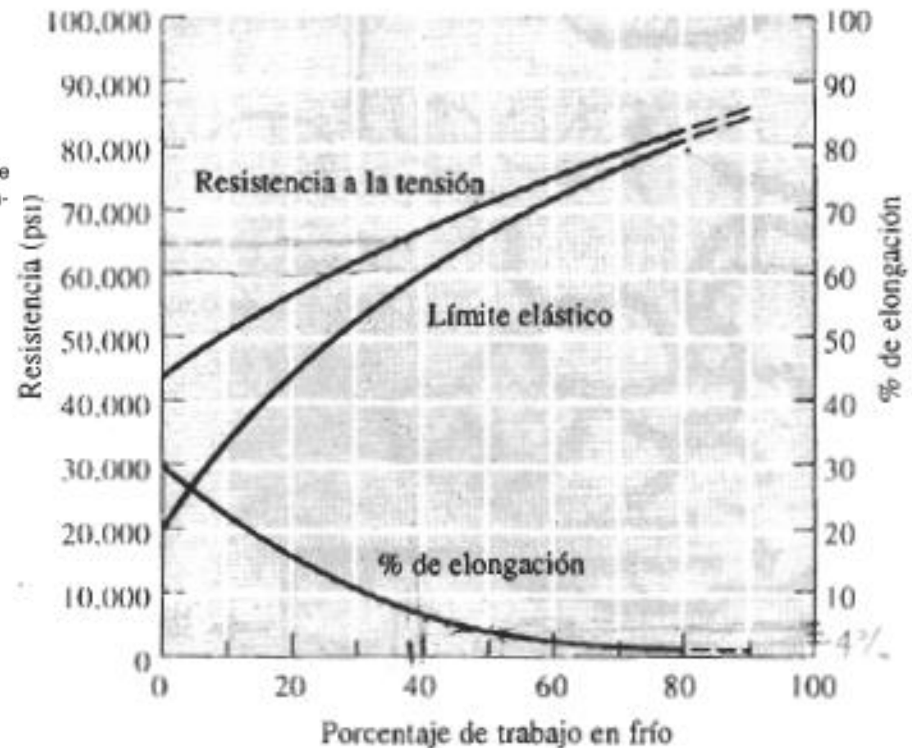


FIGURA 7-3 La fuente Frank-Read puede generar dislocaciones. (a) Una dislocación está sujeta en sus extremos por defectos en la red. (b) Conforme se sigue moviendo la dislocación, se arquea y finalmente se tuerce sobre sí misma. (c) Finalmente se forma un lazo de dislocación (d) creándose una dislocación nueva. (e) Microfotografía electrónica de una fuente Frank-Read (¥ 30,000). (*De J. Brittain, "Climb Sources in Beta Prime-NiAl"*, Metallurgical Transactions, *Vol. 6A, abril 1975.*)





Pagina de videos de dislocaciones;

http://zig.onera.fr/DisGallery/index.html
https://www.youtube.com/watch?v=3VHKGGoyZQk
https://www.youtube.com/watch?v=r-geDwE8Z5Y
https://www.youtube.com/watch?v=iD8QkWnRWQM
https://www.youtube.com/watch?v=BV1cxwxnhPs
https://www.youtube.com/watch?v=1LqRE4hCBIY
https://www.youtube.com/watch?v=EXbiEopDJ_g
https://www.youtube.com/watch?v=FjljUOG88D8

https://www.youtube.com/watch?v=p5ljeTj8x8M (Javier Moya)

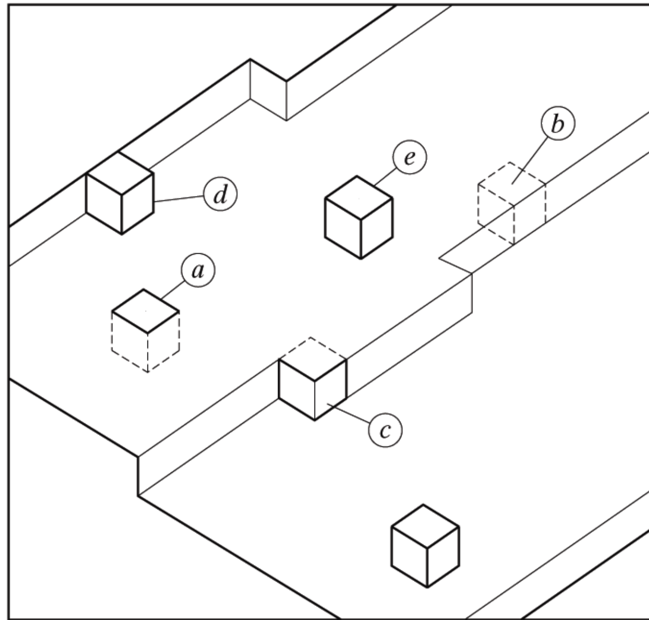


Figure 4.17

A more detailed model of the elaborate ledgelike structure of the surface of a crystalline material. Each cube represents a single atom. [From J. P. Hirth and G.M. Pound, J. Chem. Phys. 26*, 1216 (1957).]*

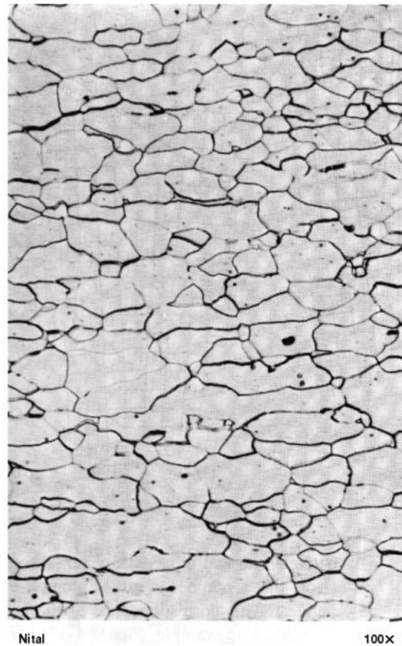


Figure 4.18

Typical optical micrograph of a grain structure, 100×. The material is a low-carbon steel. The grain boundaries have been lightly etched with a chemical solution so that they reflect light differently from the polished grains, thereby giving a distinctive contrast. (From Metals Handbook*, 8th ed., Vol. 7:* Atlas of Microstructures of Industrial Alloys*, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1972.)*

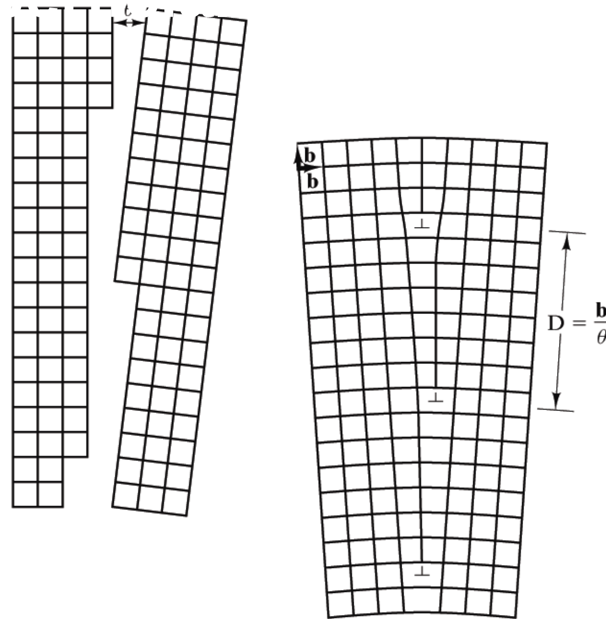


Figure 4.19

Simple grain-boundary structure. This is termed a tilt boundary because it is formed when two adjacent crystalline grains are tilted relative to each other by a few degrees (θ). The resulting structure is equivalent to isolated edge dislocations separated by the distance b/θ , where b is the length of the Burgers vector, **b**. *(From W. T. Read,* Dislocations in Crystals, *McGraw-Hill Book Company, NY, 1953. Reprinted with permission of the McGraw-Hill Book Company.)*

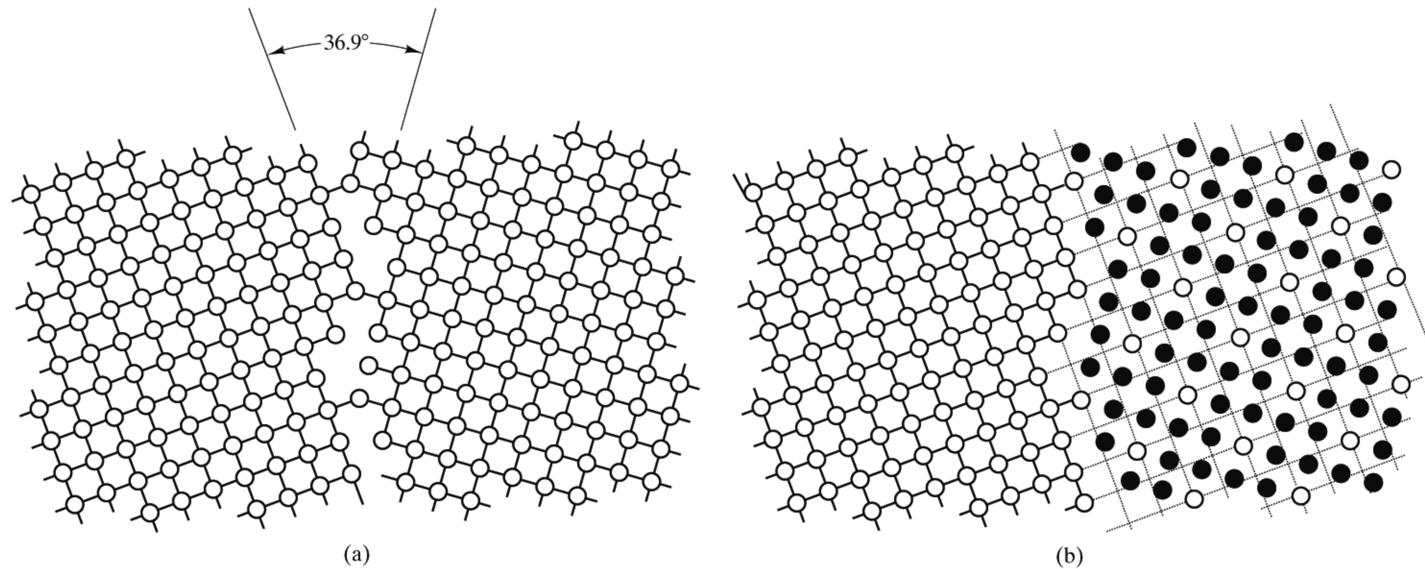


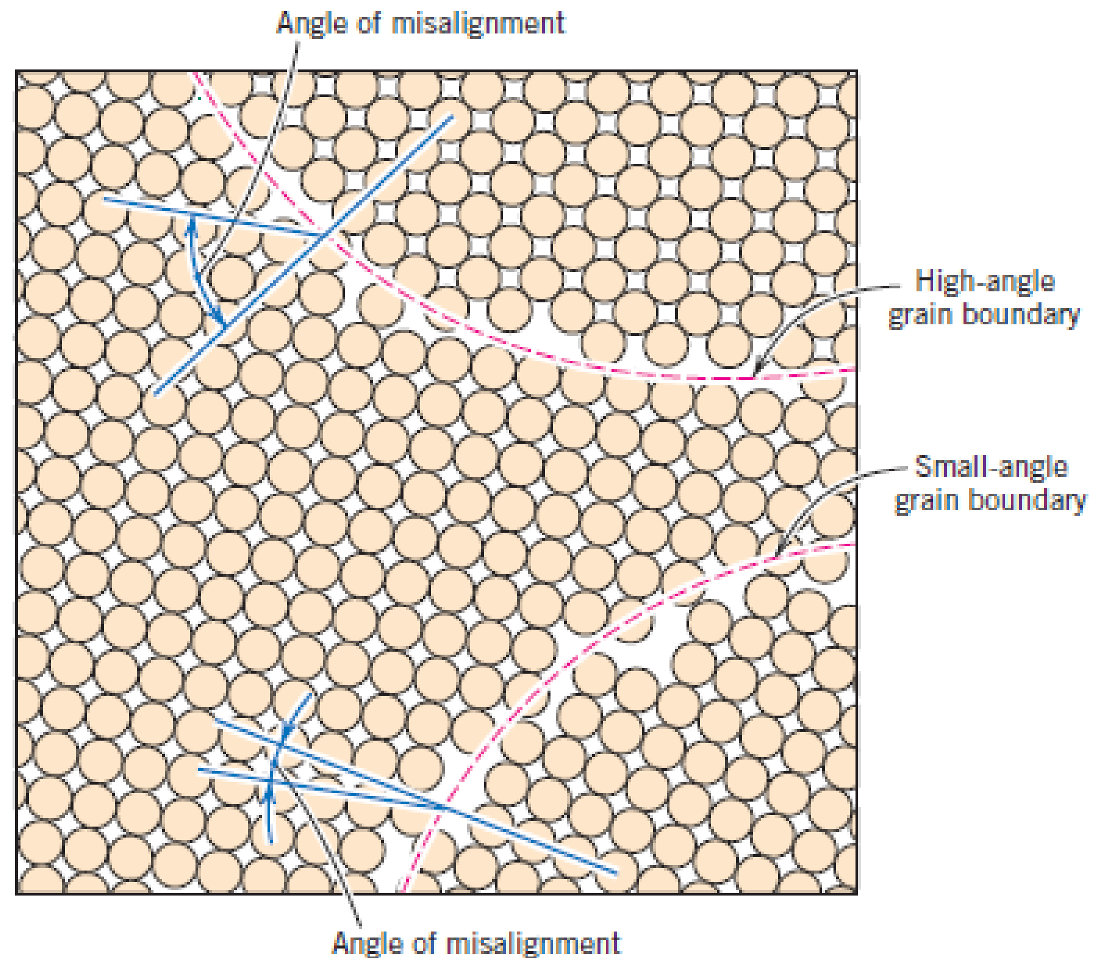
Figure 4.20

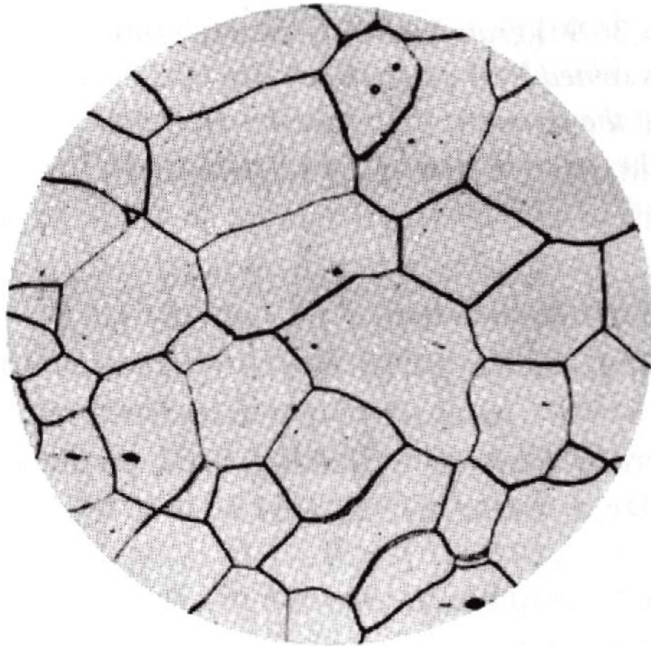
(a) A high-angle ($\theta = 36.9°$) grain boundary between two square lattice grains can be represented by a coincident site lattice, as shown in (b). As one in five of the atoms in the grain on the right is coincident with the lattice of the grain on the left, the boundary is said to have $\Sigma^{-1} = 1/5$, or $\Sigma = 5$.

Existen diferentes grados de desalineamiento. Hay ausencia de enlaces completos y un arreglo desorganizado.

La energía interfacial total es menor en los materiales con grano grande (el área total es menor) , que en los de grano pequeño

La densidad de un monocristal es muy similar a la de policristal





Nital 100×

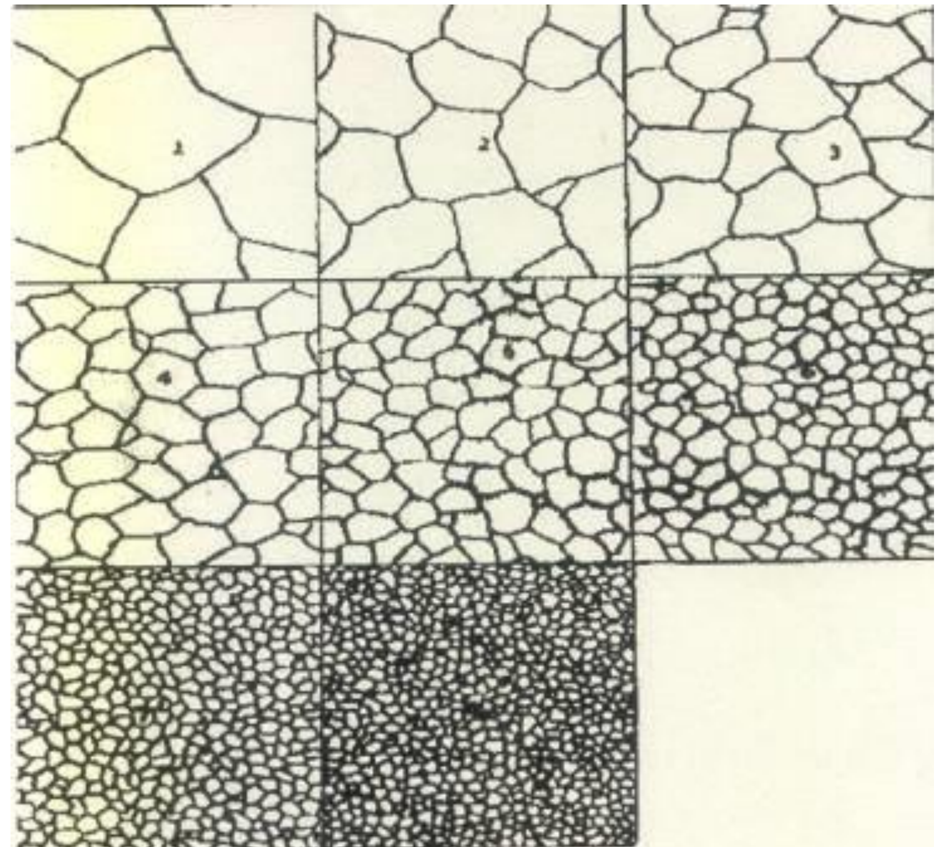
Figure 4.22

Specimen for the calculation of the grain-size number, G, 100×. The material is a low-carbon steel similar to that shown in Figure 4.18. (From Metals Handbook, *8th ed., Vol. 7:* Atlas of Microstructures of Industrial Alloys, *American Society for Metals, Metals Park, OH, 1972.)*

$$N = 2^{n-1}$$

n < 5 Grano grueso

n > 7 Grano fino



ASTM: American Society for Testing and Materials

N: Número de granos en 1 pulgada cuadadra

n: Tamaño de grano ASTM

Microscopia óptica

En búsqueda del tamaño y forma de los granos.

Sistema óptico y de iluminación.

Materiales que son opacos a la luz visible

Regiones en la microestructura generan diferencias de reflexión y dan contrastes

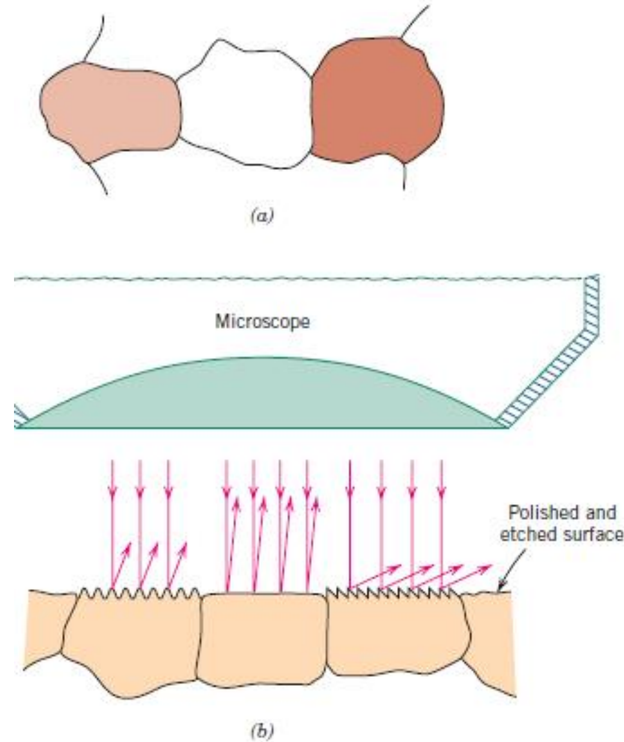
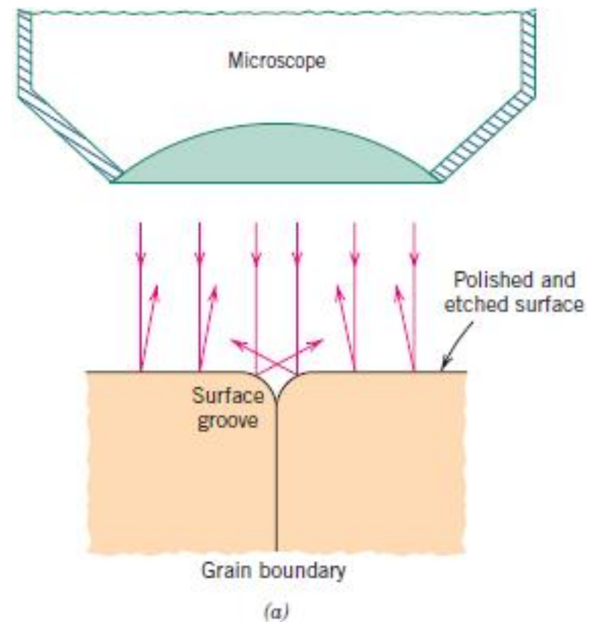


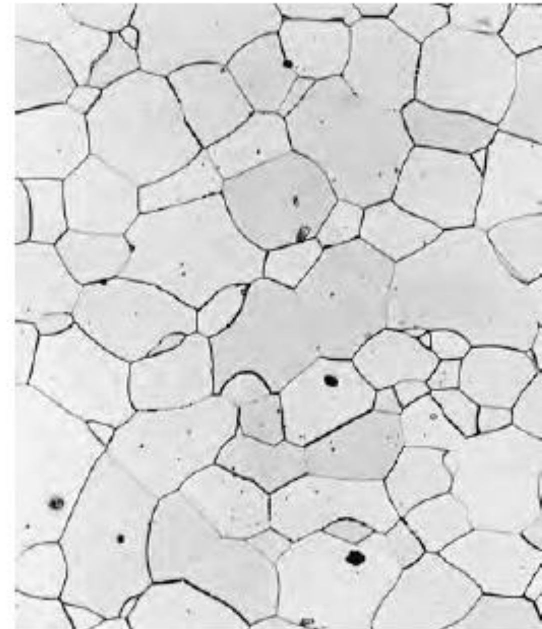


Figure 4.13
(*a*) Polished and etched grains as they might appear when viewed with an optical microscope. (*b*) Section taken through these grains showing how the etching characteristics and resulting surface texture vary from grain to grain because of differences in crystallographic orientation. (*c*) Photomicrograph of a polycrystalline brass specimen. 60×. (Photomicrograph courtesy of J. E. Burke, General Electric Co.)

Los límites de grano son mas reactivos y se disuelven a mayor velocidad. Reflejan la luz con ángulo diferente a los granos



Λ = 400-700 nm
Resolución: 0.25um,
2000X



Electron Beam
Electron Gun
Anode
Magnetic Lens
To TV Scanner
Scanning Coils
Backscattered Electron Detector
Secondary Electron Detector
Stage
Specimen

Gun supply
Electron gun
Electron beam
First condenser lens
Lens supply
Second condenser lens
Final lens
Scanning coils
Scanning circuits
Specimen
Electron-collection system
Display and record unit
Magnification unit
Signal amplifiers
Vacuum system
(a)

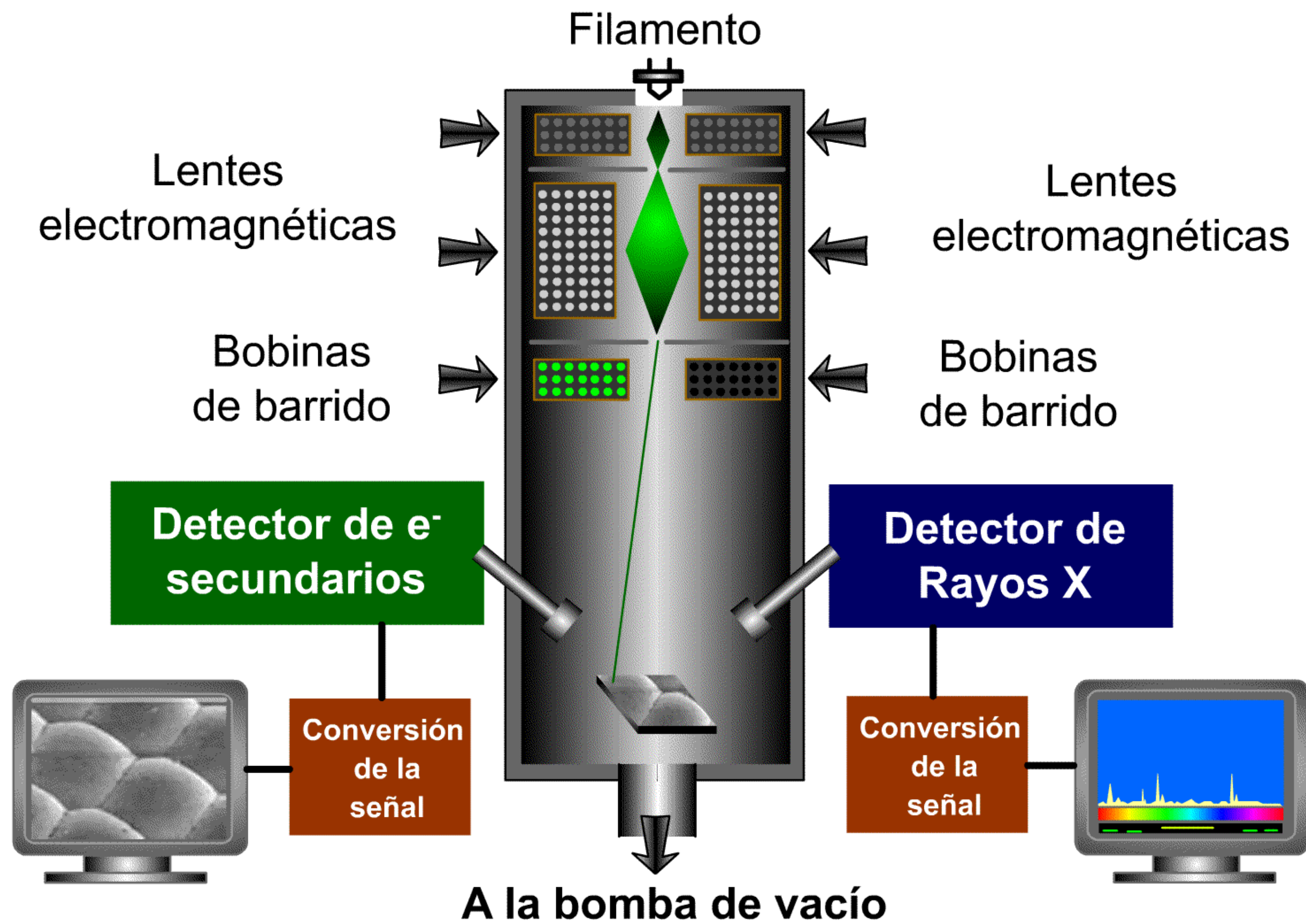
e-



(b)

Figure 4.30

a) Schematic of the design of a scanning electron microscope (SEM). (From V. A. Phillips, M
letallographic Techniques and Their Applications, John Wiley & Sons, Inc., NY, 1971.) (b) A
ommercial SEM. (Courtesy of Hitachi Scientific Instruments.)


Filamento
Lentes electromagnéticas
Lentes electromagnéticas
Bobinas de barrido
Bobinas de barrido
Detector de e⁻ secundarios
Detector de Rayos X
Conversión de la señal
Conversión de la señal
A la bomba de vacío

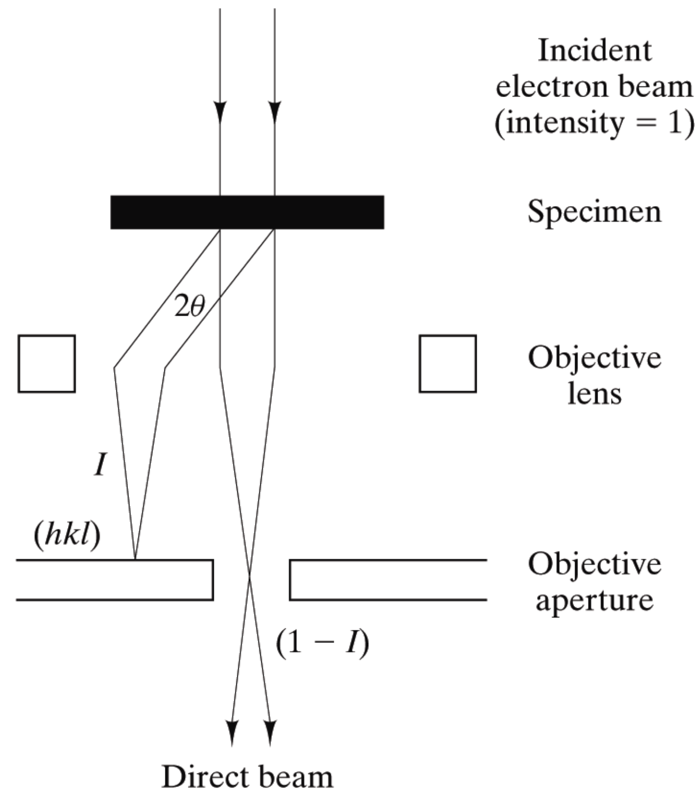
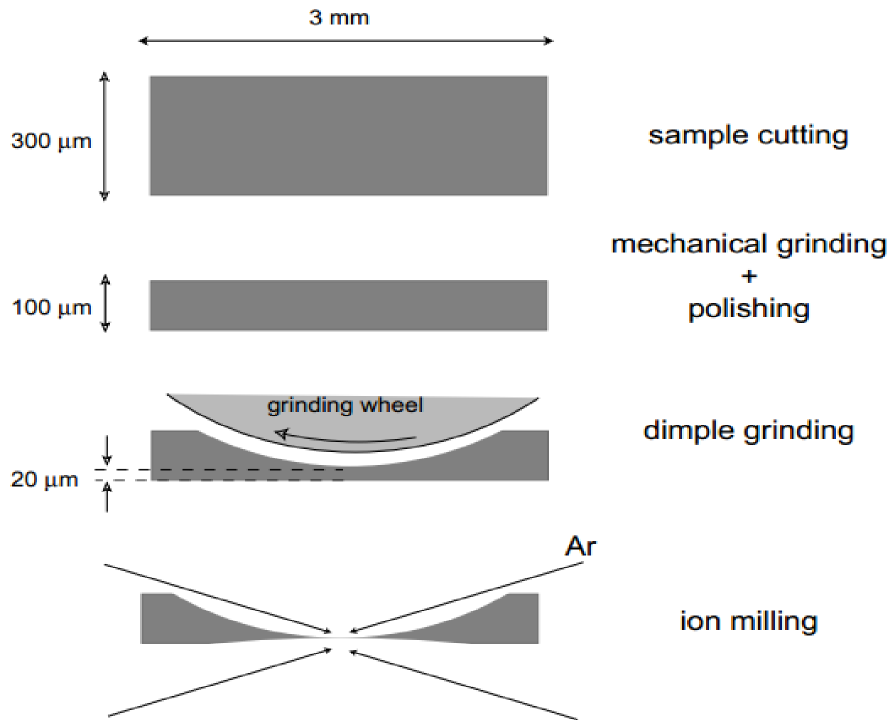


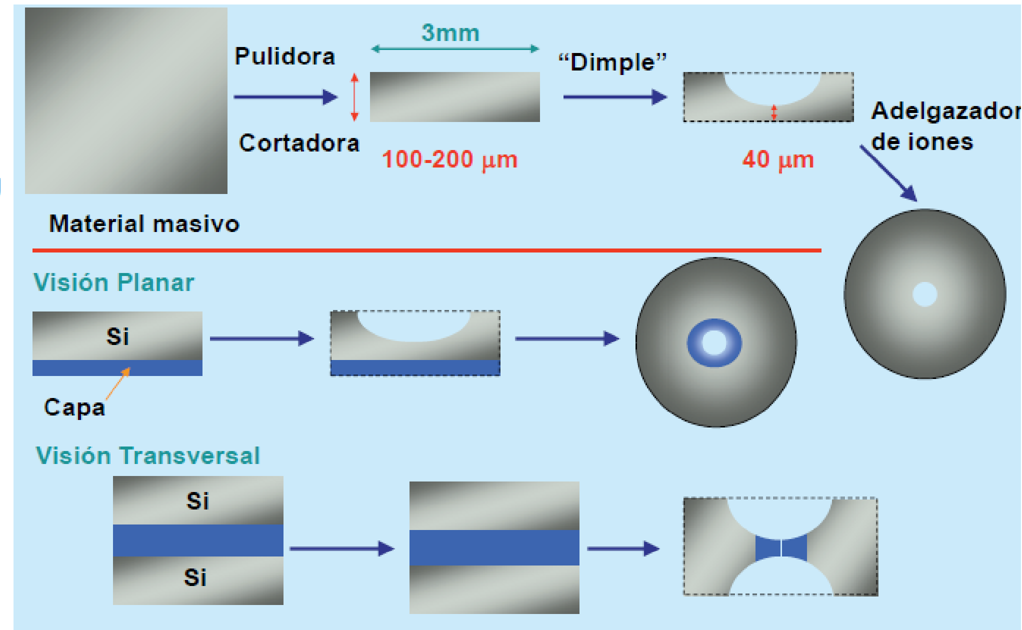
Figure 4.28

The basis of image formation in the TEM is diffraction contrast. Structural variations in the sample cause different fractions (I) of the incident beam to be diffracted out, giving variations in image darkness at a final viewing screen. (From G. Thomas, Transmission Electron Microscopy of Metals*, John Wiley & Sons, Inc., NY, 1962.)*

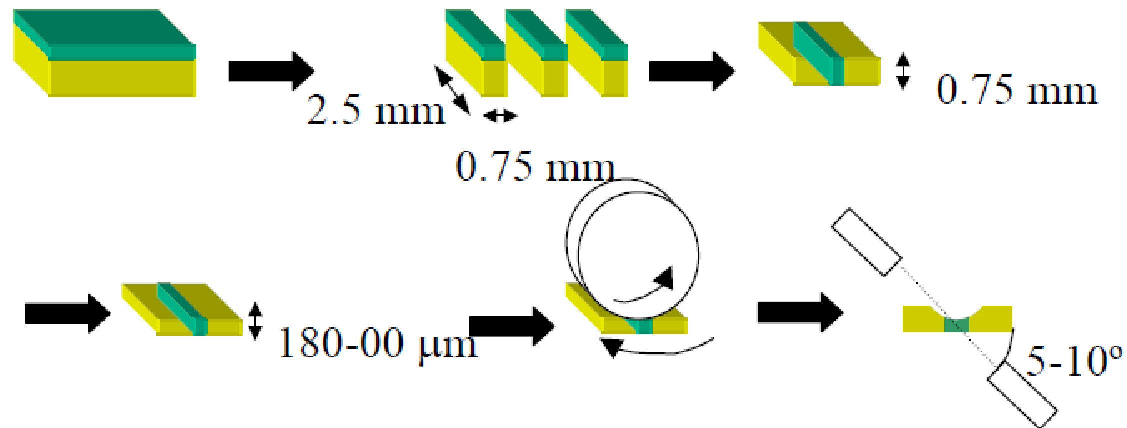
PREPARACIÒN DE MUESTRAS



TEM sample preparation of AMCs.



RECUBRIMIENTO



http://cimewww.epfl.ch/people/cayron/Fichiers/thesebook-chap3.pdf

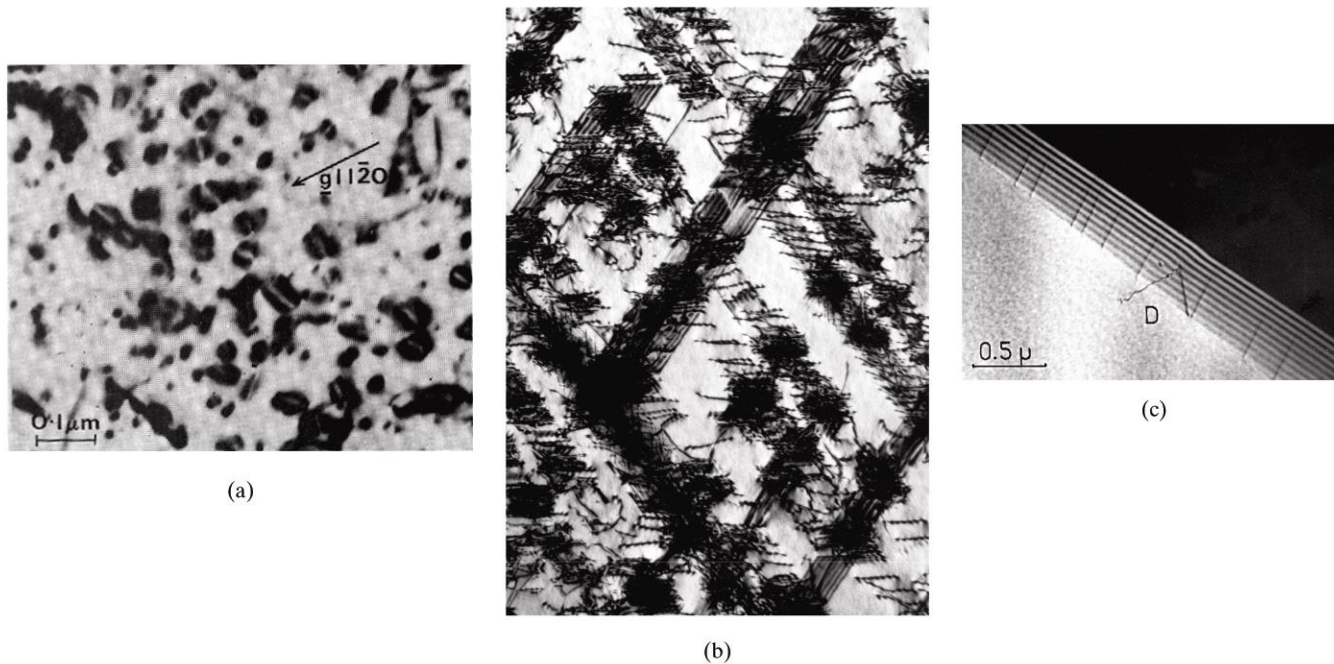
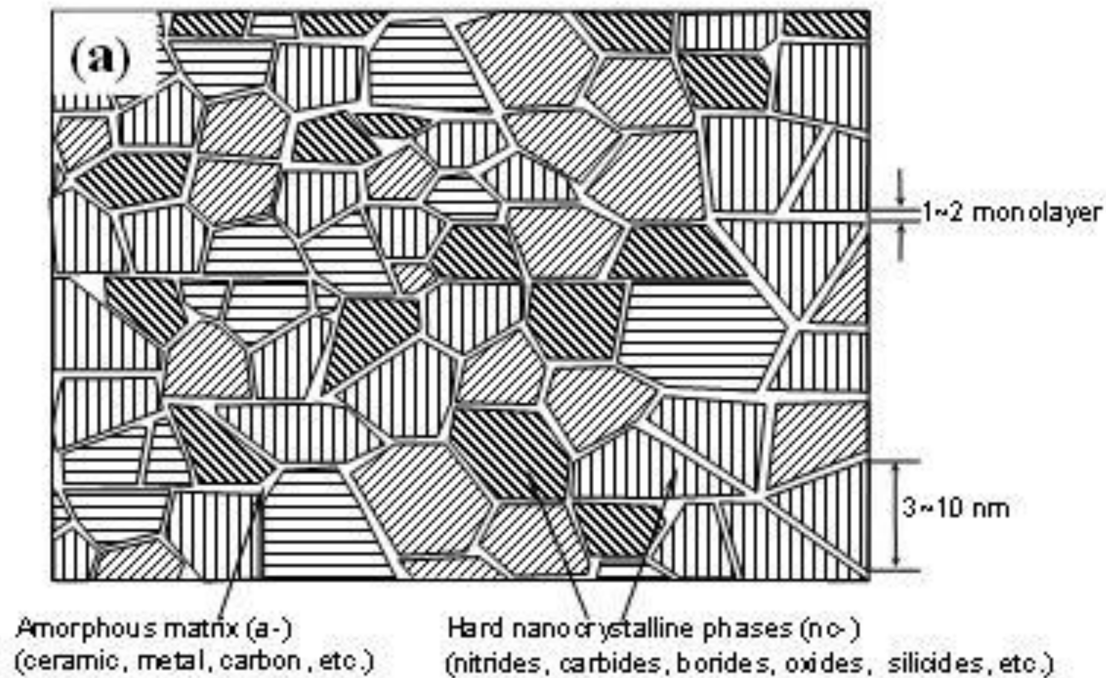


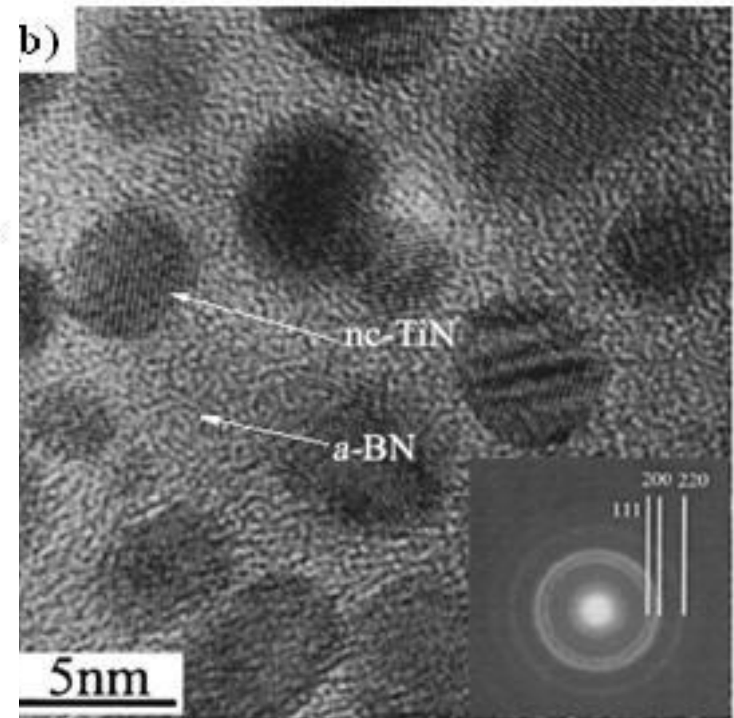
Figure 4.29

(a) TEM image of the strain field around small dislocation loops in a zirconium alloy. These loops result from a condensation of point defects (either interstitial atoms or vacancies) after neutron irradiation. (b) Forest of dislocations in a stainless steel as seen by a TEM. (c) TEM image of a grain boundary. The parallel lines identify the boundary. A dislocation intersecting the boundary is labeled "D." [(a) From A. Riley and P. J. Grundy, Phys. Status Solidi (a) 14, *239 (1972). (b)*

Courtesy of Chuck Echer, Lawrence Berkeley National Laboratory, National Center for Electron Microscopy.

(c) From P. H. Pumphrey and H. Gleiter, Philos. Mag. *30, 593 (1974).]*





http://acsel.mines.edu/research(nanocomposite%20coating).html

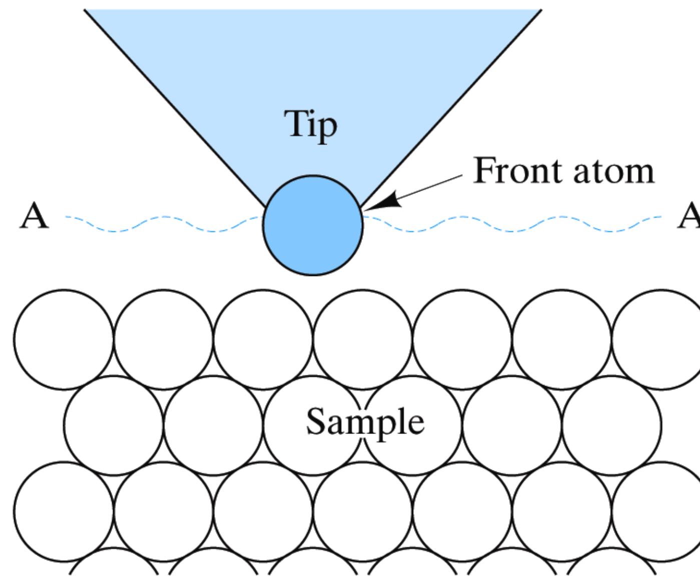
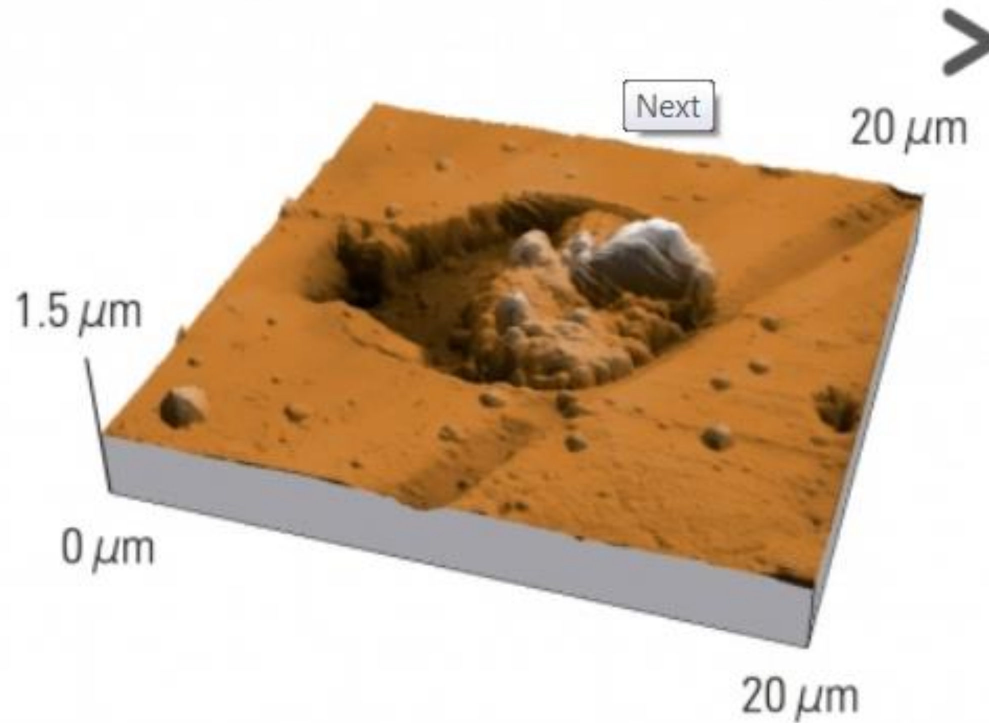


Figure 4.35

Schematic of the principle by which the probe tip of either a scanning-tunneling microscope (STM) or an atomic-force microscope (AFM) operates. The sharp tip follows the contour A–A as it maintains either a constant tunneling current (in the STM) or a constant force (in the AFM). The STM requires a conductive sample, while the AFM can also inspect insulators.



https://www.platit.com/en/surface-analysis-afm

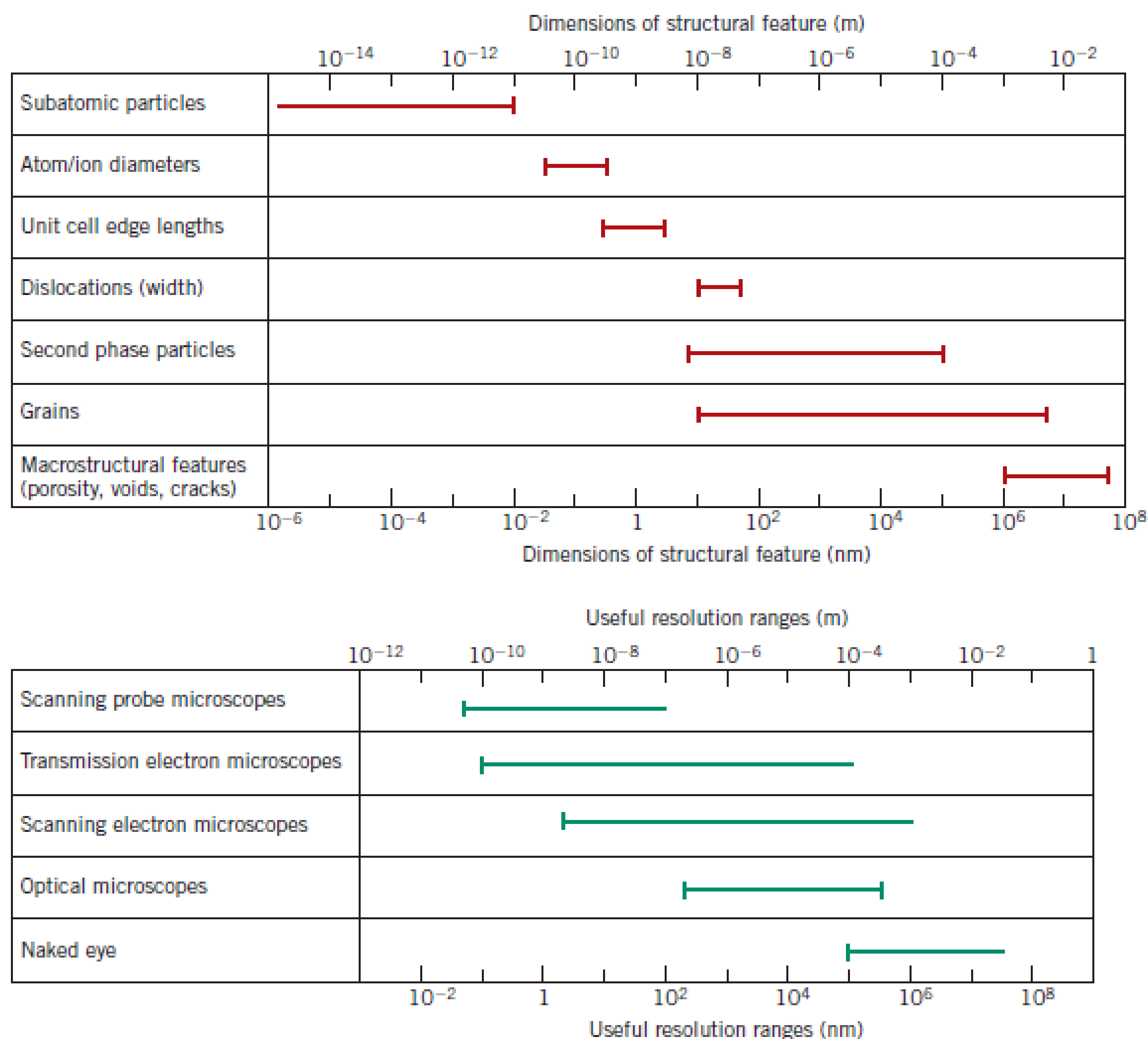


Figure 4.15 (*a*) Bar-chart showing size ranges for several structural features found in materials. (*b*) Bar-chart showing the useful resolution ranges for four microscopic techniques discussed in this chapter, in addition to the naked eye. (Courtesy of Prof. Sidnei Paciornik, DCMM PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brazil, and Prof. Carlos Pérez Bergmann, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil.)

INTRODUCCIÒN A LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

1. TIPO DE ENLACE
2. DISPOSICIÓN ESTRUCTURAL DE LOS ÁTOMOS O MOLÉCULAS
3. TIPO Y NÚMERO DE DEFECTOS

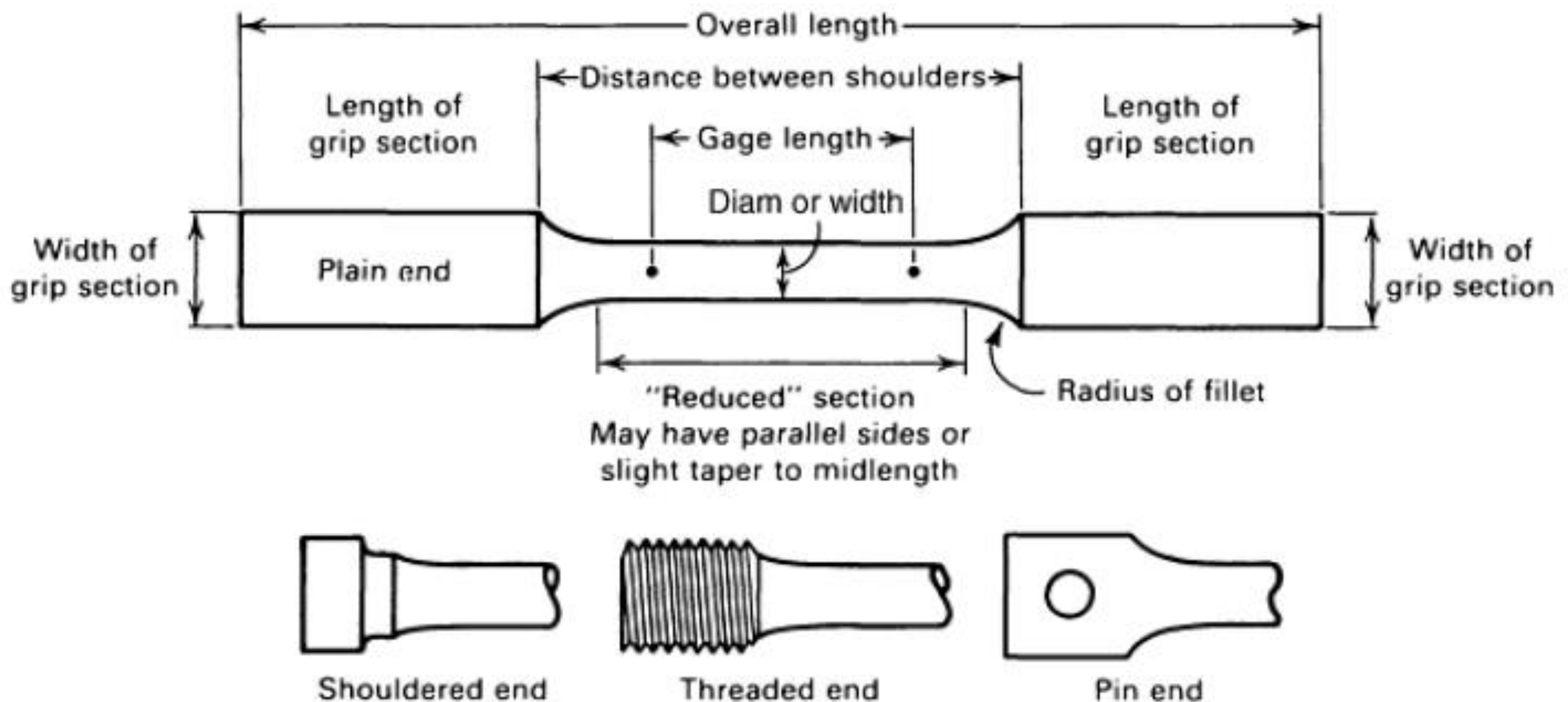
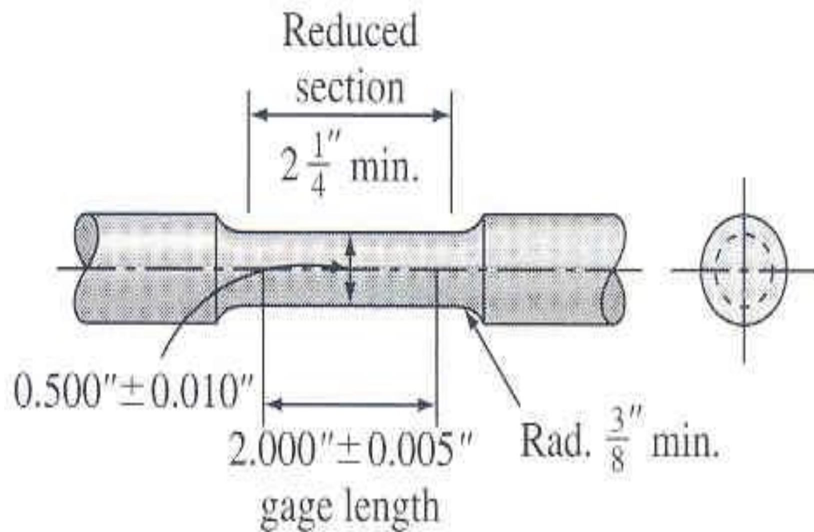
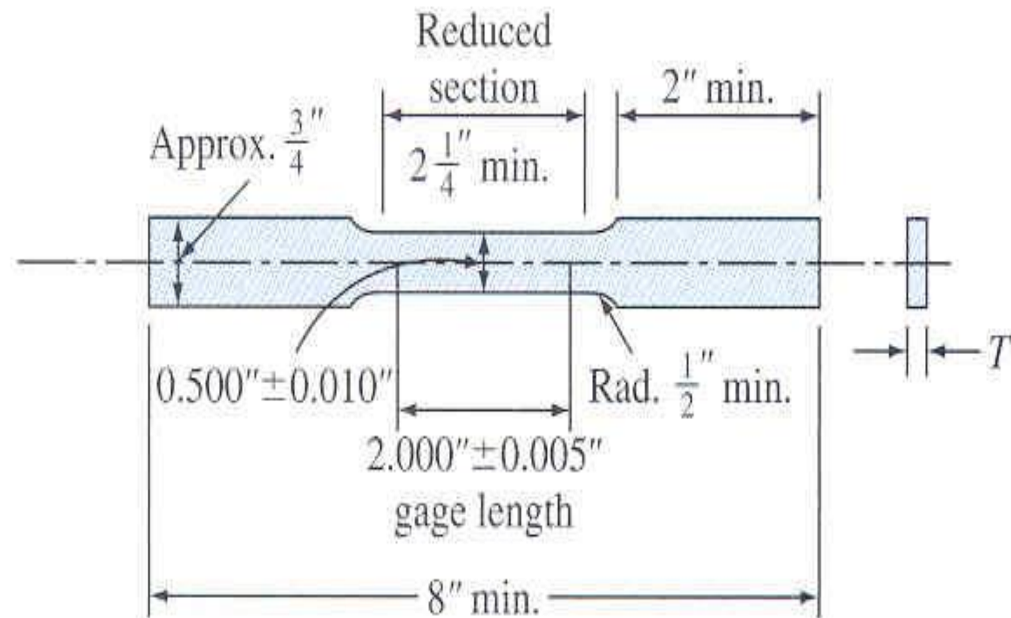


Fig. 21 Nomenclature for a typical tension test piece

Norma ASTM E 8-79





Probeta cilíndrica **Probeta Plana**

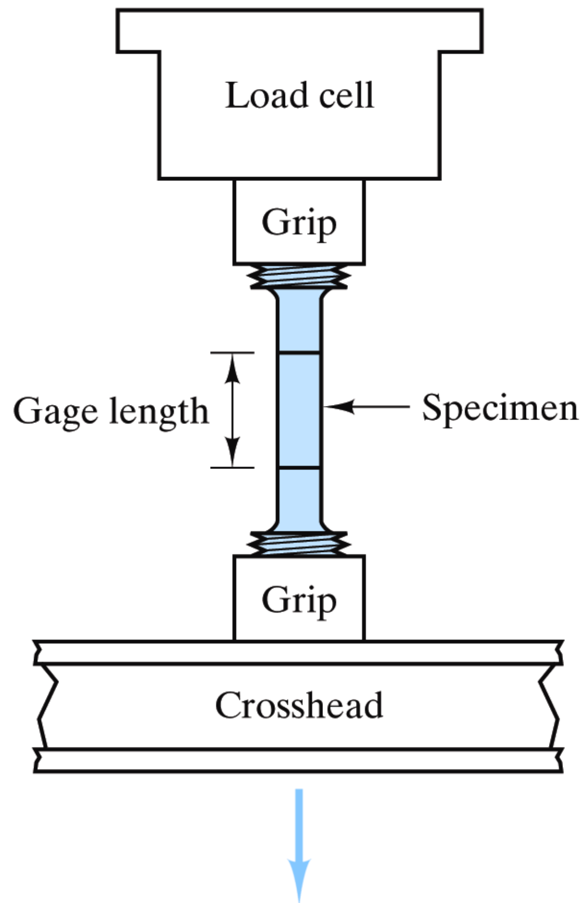


Figure 6.1

Tensile test.

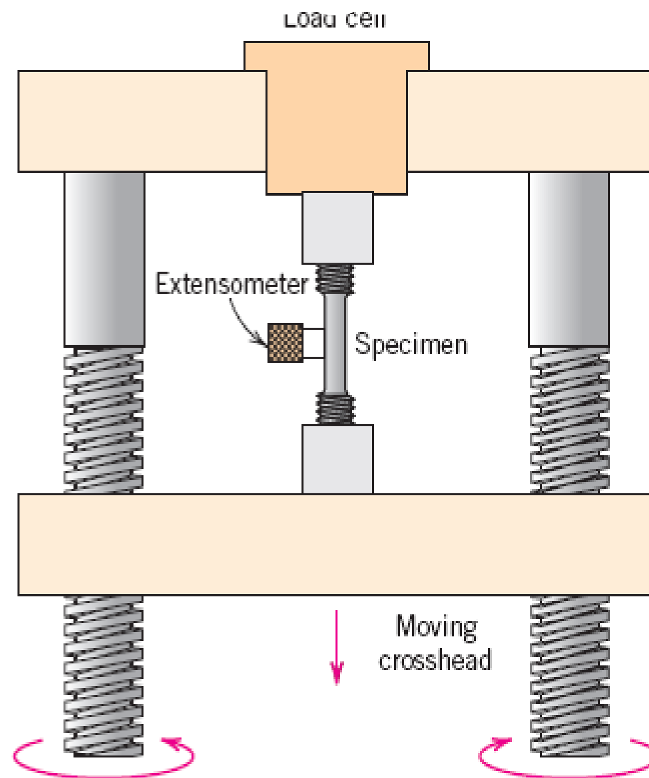




Figure 6.7

Neck down of a tensile test specimen within its gage length after extension beyond the tensile strength. *(Courtesy of R. S. Wortman.)*

RESULTADOS

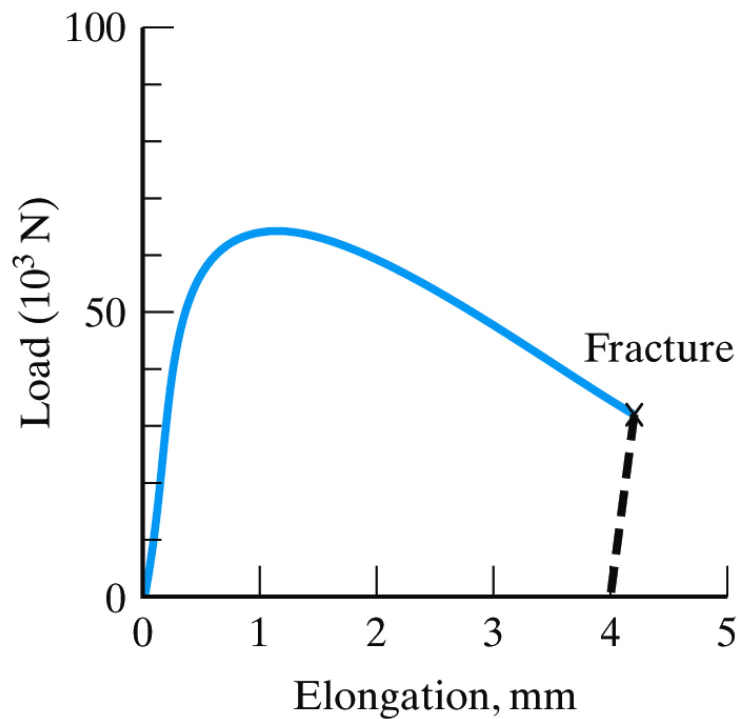


Figure 6.2

Load-versus-elongation curve obtained in a tensile test. The specimen was aluminum 2024-T81.

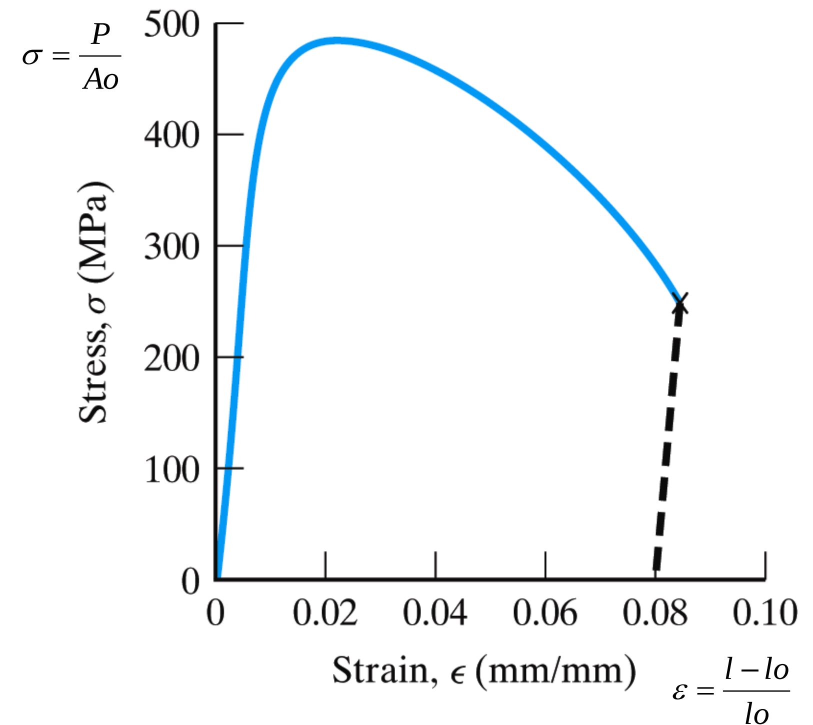
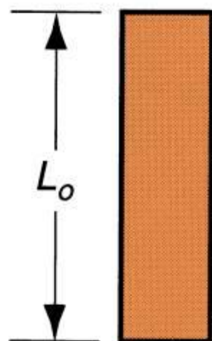
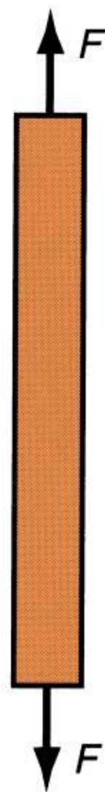


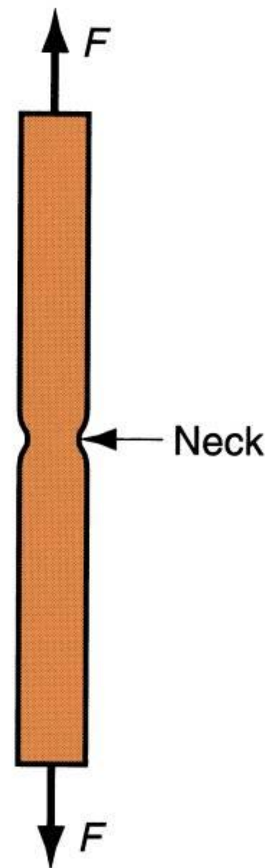
Figure 6.3

Stress-versus-strain curve obtained by normalizing the data of Figure 6.2 for specimen geometry.

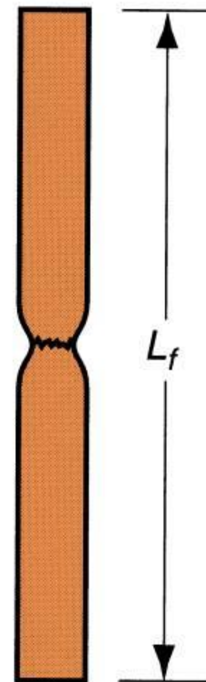












(1) (2) (3) (4) (5) (6)

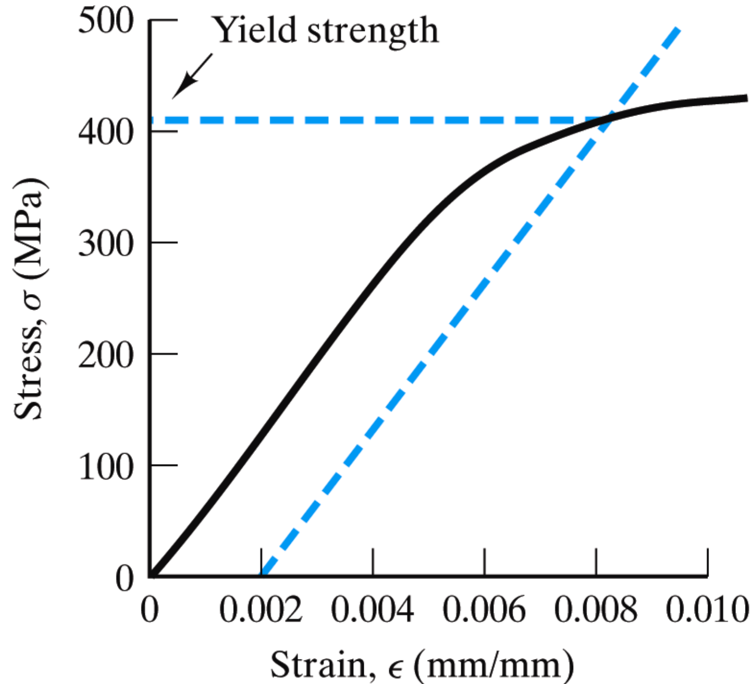


Figure 6.4

The yield strength is defined relative to the intersection of the stress–strain curve with a "0.2% offset." Yield strength is a convenient indication of the onset of plastic deformation.

Se dificulta el punto de transición de zona elástica a la zona plástica. Para ello, se utiliza el 0.2% de la deformación ($R_{p0.2}$). **Esfuerzo donde se genera una deformación plástica en el material de 0.2%.**

$$E = \frac{\sigma(Esfuerzo)}{\varepsilon(Deformación)}$$

Acero 207 GPa

Aluminio 75 GPa

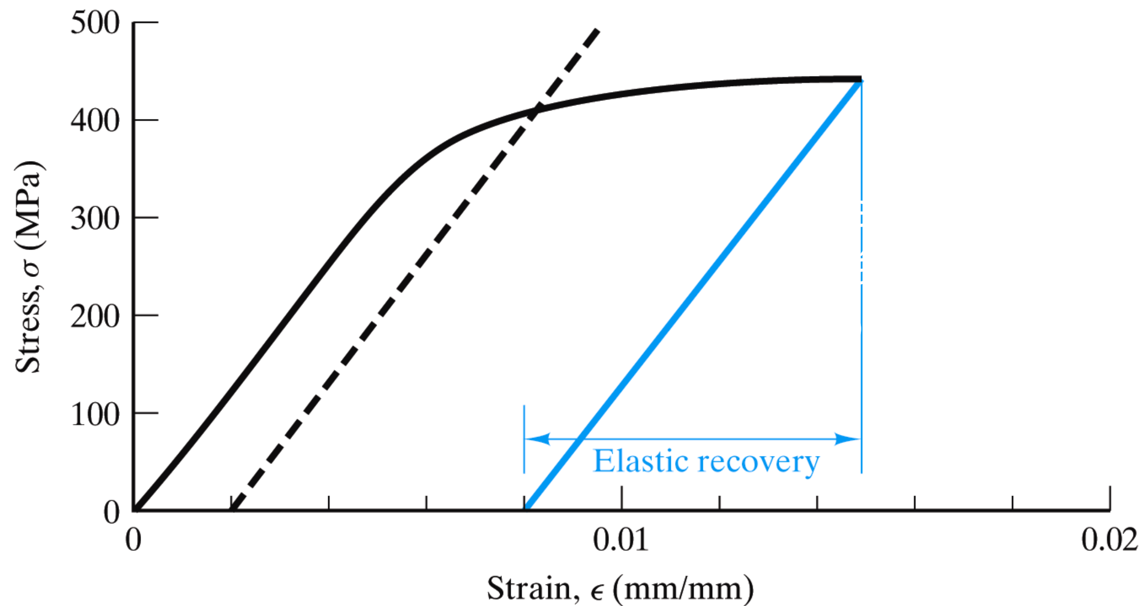
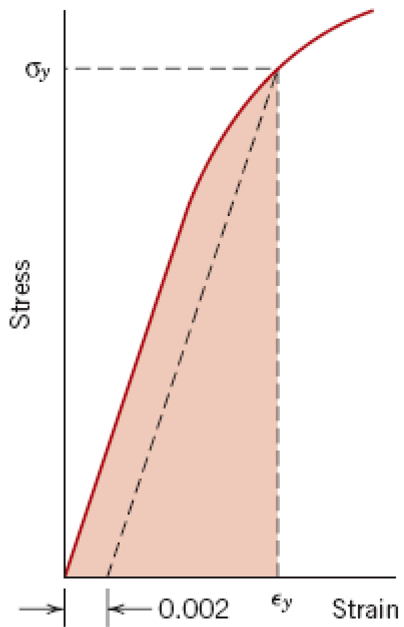


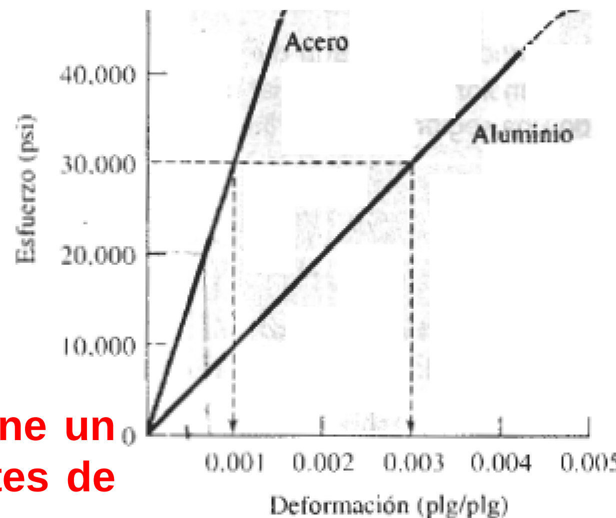
Figure 6.5

Elastic recovery occurs when stress is removed from a specimen that has already undergone plastic deformation.



$$U_r = \frac{1}{2}\sigma_y \epsilon_y$$

Resiliencia: la capacidad que tiene un material de absorber energía antes de deformarse plásticamente.

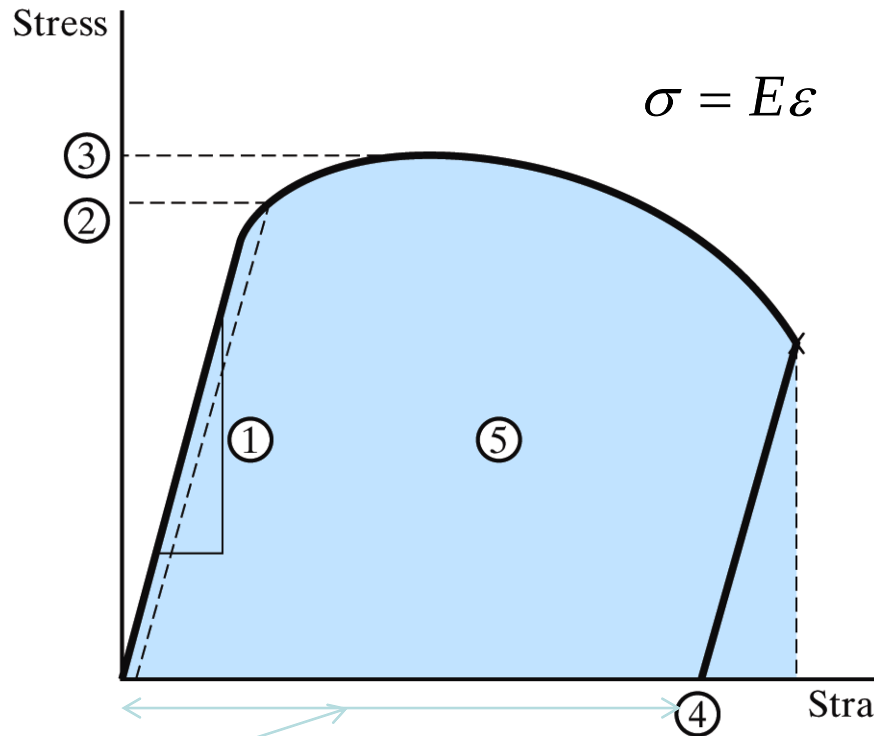


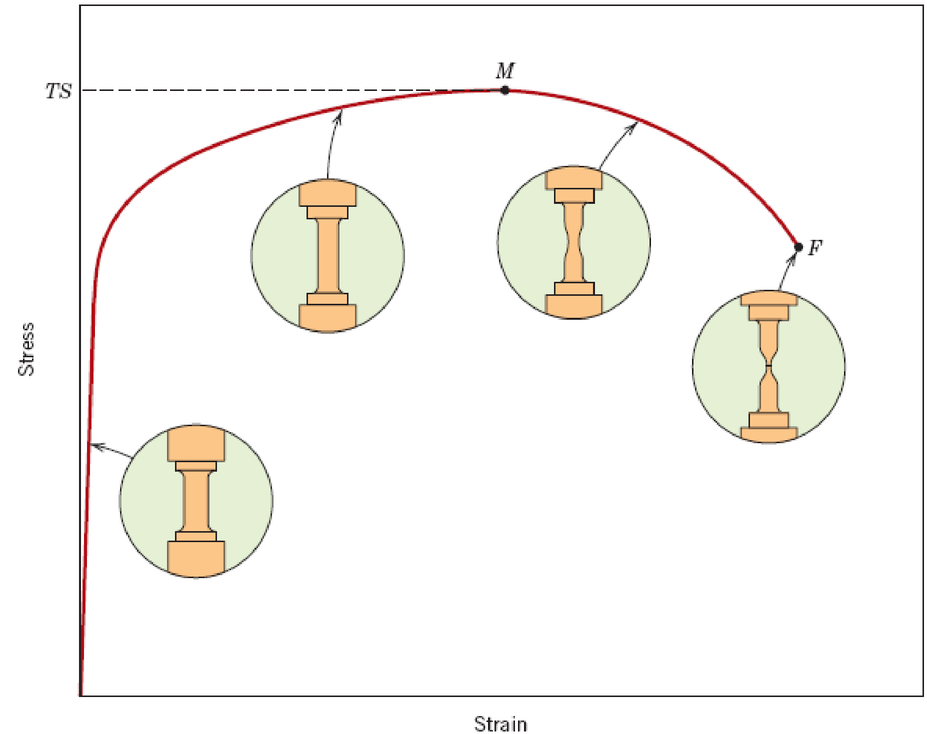
Rigidez: es la capacidad de no deformarse en la zona elástica.

El acero es más rígido, a mayor pendiente mayor rigidez.

FIGURA 6-5 Comparación del comportamiento elástico del acero y del aluminio.

Resumen de las propiedades mecánicas en el ensayo de tracción





Dùctilidad: es la capacidad que tiene un material para deformarse plásticamente antes de fracturar.

El modulo elástico representa la rigidez del material = resistencia a la deformación elástica, o como su grado de recuperación elástica.

El límite elástico representa la resistencia del material a la deformación permanente, es decir, la facilidad con que un material puede ser conformado.

Cuando el material alcanza el valor de la resistencia a la tracción, la probeta inicia un proceso de estricción

$$\%Area = \frac{Ao - Afinal}{Ao}$$

Tenacidad

Combina la resistencia y la ductilidad y se representa el área bajo la curva esfuerzo-deformación.

ES LA ENERGIA POR UNIDAD DE VOLUMEN QUE PUEDE ABSORBER UN MATERIAL ANTES DE ROMPERSE, ES EQUIVALENTE AL AREA DEBAJO DE LA CURVA.

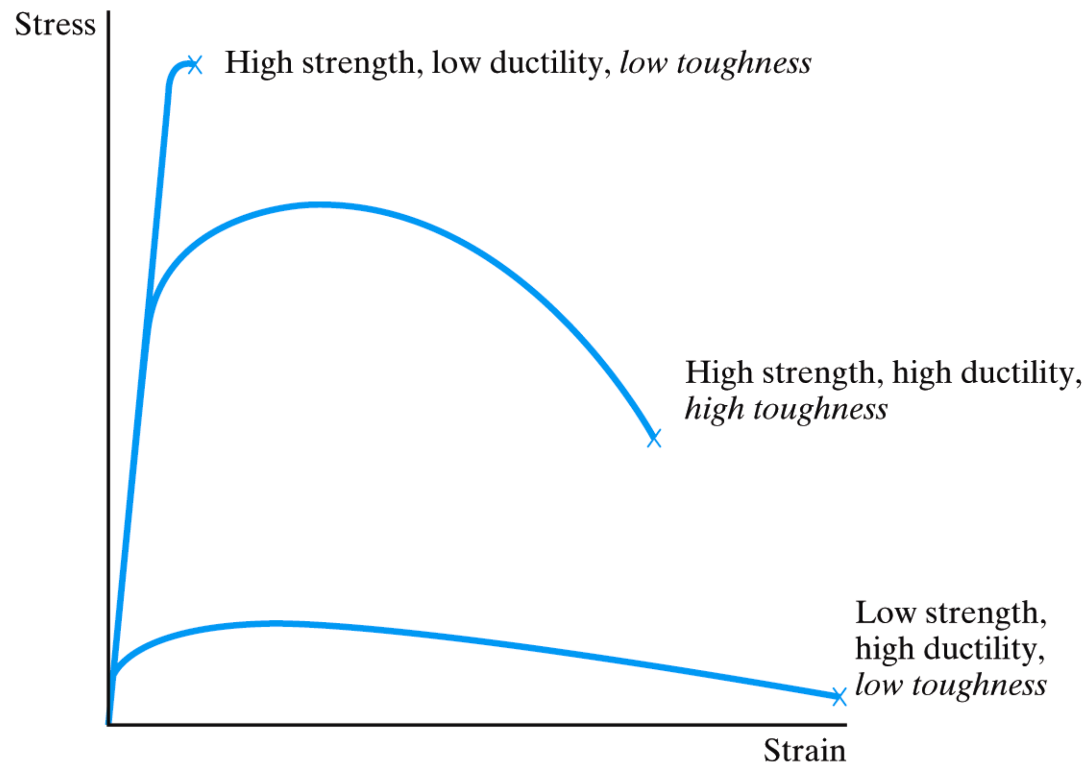


Figure 6.9

The toughness of an alloy depends on a combination of strength and ductility.

	Alloy	E [GPa (psi)]	Y.S. [MPa (ksi)]	T.S. [MPa (ksi)]	Percent elongation at failure
1.	1040 carbon steel	200 (29×10^6)	600 (87)	750 (109)	17
2.	8630 low-alloy steel		680 (99)	800 (116)	22
3.	a. 304 stainless steel	193 (28×10^6)	205 (30)	515 (75)	40
	c. 410 stainless steel	200 (29×10^6)	700 (102)	800 (116)	22
4.	L2 tool steel		1,380 (200)	1,550 (225)	12
5.	Ferrous superalloy (410)	200 (29×10^6)	700 (102)	800 (116)	22
6.	a. Ductile iron, quench	165 (24×10^6)	580 (84)	750 (108)	9.4
	b. Ductile iron, 60–40–18	169 (24.5×10^6)	329 (48)	461 (67)	15
7.	a. 3003-H14 aluminum	70 (10.2×10^6)	145 (21)	150 (22)	8–16
	b. 2048, plate aluminum	70.3 (10.2×10^6)	416 (60)	457 (66)	8
8.	a. AZ31B magnesium	45 (6.5×10^6)	220 (32)	290 (42)	15
	b. AM100A casting magnesium	45 (6.5×10^6)	83 (12)	150 (22)	2
9.	a. Ti–5Al–2.5Sn	107–110 ($15.5–16 \times 10^6$)	827 (120)	862 (125)	15
	b. Ti–6Al–4V	110 (16×10^6)	825 (120)	895 (130)	10
10.	Aluminum bronze, 9% (copper alloy)	110 (16.1×10^6)	320 (46.4)	652 (94.5)	34
11.	Monel 400 (nickel alloy)	179 (26×10^6)	283 (41)	579 (84)	39.5
12.	AC41A zinc			328 (47.6)	7
13.	50:50 solder (lead alloy)		33 (4.8)	42 (6.0)	60
14.	Nb–1 Zr (refractory metal)	68.9 (10×10^6)	138 (20)	241 (35)	20
15.	Dental gold alloy (precious metal)			310–380 (45–55)	20–35

Table 6.2

Tensile Test Data for the Alloys of Table 6.1.

RESUMEN

Table 7.2 Room-Temperature Mechanical Properties (in Tension) for Various Materials

Material	Yield Strength		Tensile Strength		Ductility, %EL [in 50 mm (2 in.)][a]
	MPa	ksi	MPa	ksi	
Metal Alloys[b]					
Molybdenum	565	82	655	95	35
Titanium	450	65	520	75	25
Steel (1020)	180	26	380	55	25
Nickel	138	20	480	70	40
Iron	130	19	262	38	45
Brass (70 Cu–30 Zn)	75	11	300	44	68
Copper	69	10	200	29	45
Aluminum	35	5	90	13	40

$$\sigma_T = \sigma(1 + \epsilon)$$

$$\epsilon_T = \ln(1 + \epsilon)$$

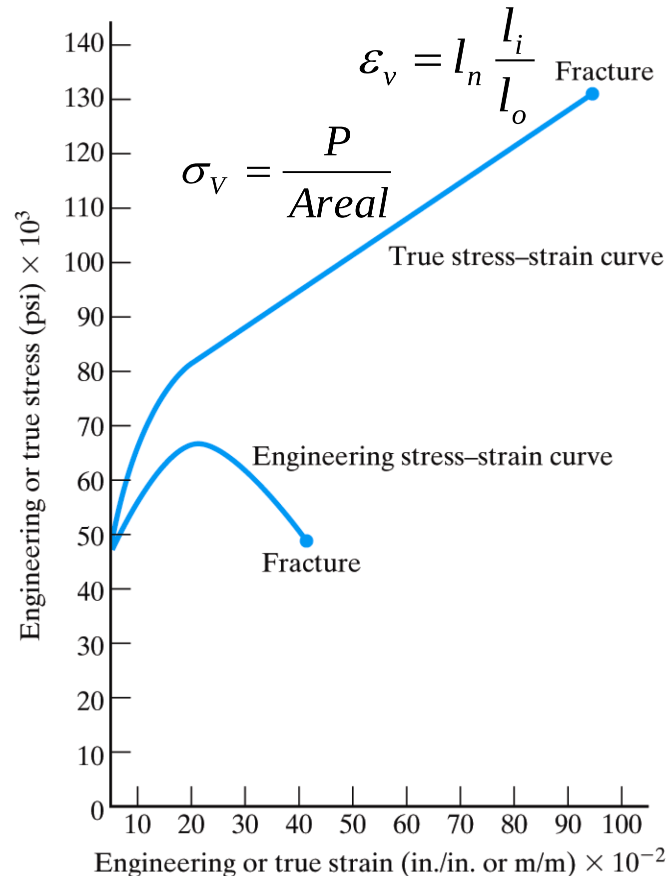


Figure 6.8

True stress (load divided by actual area in the necked-down region) continues to rise to the point of fracture, in contrast to the behavior of engineering stress. (From R. A. Flinn and P. K. Trojan, Engineering Materials and Their Applications, *2nd ed., Houghton Mifflin Company, 1981, used by permission.)*

$$\sigma_v = K\varepsilon^n$$

n es el exponente de endurecimiento por deformación. Capacidad de ser deformados sin la formación de alguna fractura.

Los materiales con bajos valores de n responden mal al trabajo en frío.

K es el coeficiente de resistencia. Es igual al esfuerzo cuando ε es 1

$$n = \frac{\log \sigma_T - \log K}{\log \epsilon_T}$$

Endurecimiento por deformación

σ_1 σ_y Esfuerzo ε_1 Deformación

σ_2 σ_1 Esfuerzo ε_2 Deformación

Esfuerzo Deformación

(c)

$$\sigma_t = K\varepsilon_t^n \rightarrow \ln \sigma_t = \ln K + n \ln \varepsilon_t$$

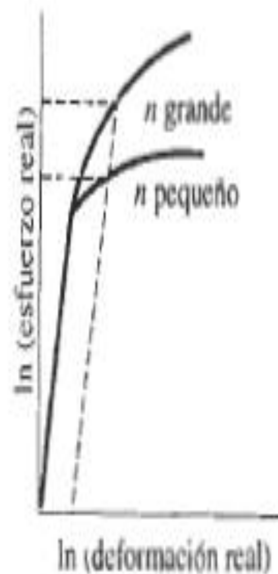
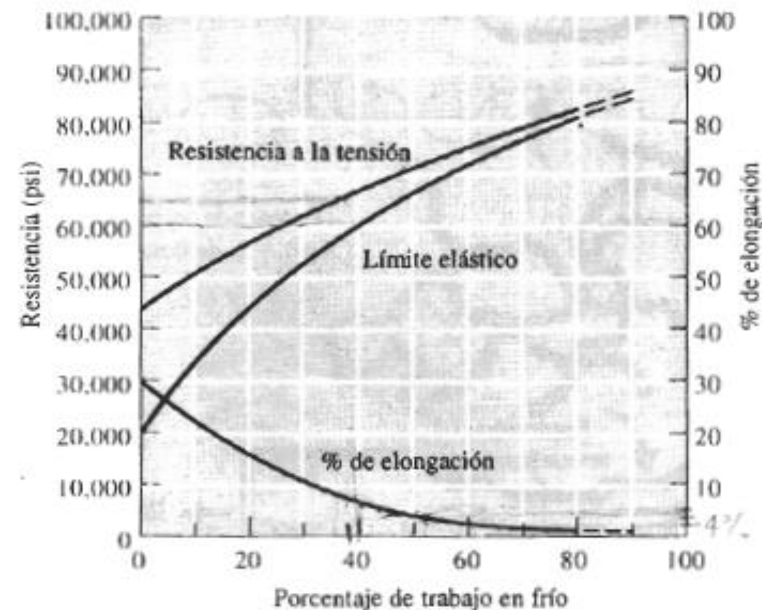


FIGURA 7-2 Curvas esfuerzo real-deformación real para metales con coeficientes de endurecimiento por deformación elevados y pequeños. Para una deformación dada se obtienen grados más importantes de endurecimiento en metales con un coeficiente *n* mayor.



Alloy	K [MPa (ksi)]	n
Low-carbon steel (annealed)	530 (77)	0.26
4340 low-alloy steel (annealed)	640 (93)	0.15
304 stainless steel (annealed)	1,275 (185)	0.45
Al (annealed)	180 (26)	0.20
2024 aluminum alloy (heat treated)	690 (100)	0.16
Cu (annealed)	315 (46)	0.54
Brass, 70Cu–30Zn (annealed)	895 (130)	0.49

Source: Data from S. Kalpakjian, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, MA, 1984.
[a] Defined by Equation 6.4.

Metal	Estructura cristalina	n	K (psi)
Titanio	HC	0.05	175,000
Aleación de acero recocida	CC	0.15	93,000
Acero de mediano carbono templado y revenido	CC	0.10	228,000
Molibdeno	CC	0.13	105,000
Cobre	CCC	0.54	46,000
Cu-30% Zn	CCC	0.50	130,000
Acero inoxidable austenítico	CCC	0.52	220,000

Adaptado de G. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill, 1961 y de otras fuentes.

MATERIAL	*K* (MPa)	*n*
Aluminum, 1100-O	180	0.20
2024-T4	690	0.16
5052-O	210	0.13
6061-O	205	0.20
6061-T6	410	0.05
7075-O	400	0.17
Brass, 70-30, annealed	895	0.49
85-15, cold-rolled	580	0.34
Bronze (phosphor), annealed	720	0.46
Cobalt-base alloy, heat treated	2070	0.50
Copper, annealed	315	0.54
Molybdenum, annealed	725	0.13
Steel, low-carbon, annealed	530	0.26
1045 hot-rolled	965	0.14
1112 annealed	760	0.19
1112 cold-rolled	760	0.08
4135 annealed	1015	0.17
4135 cold-rolled	1100	0.14
4340 annealed	640	0.15
17-4 P-H annealed	1200	0.05
52100 annealed	1450	0.07
304 stainless, annealed	1275	0.45
410 stainless, annealed	960	0.10

Note: 100 MPa = 14,500 psi.

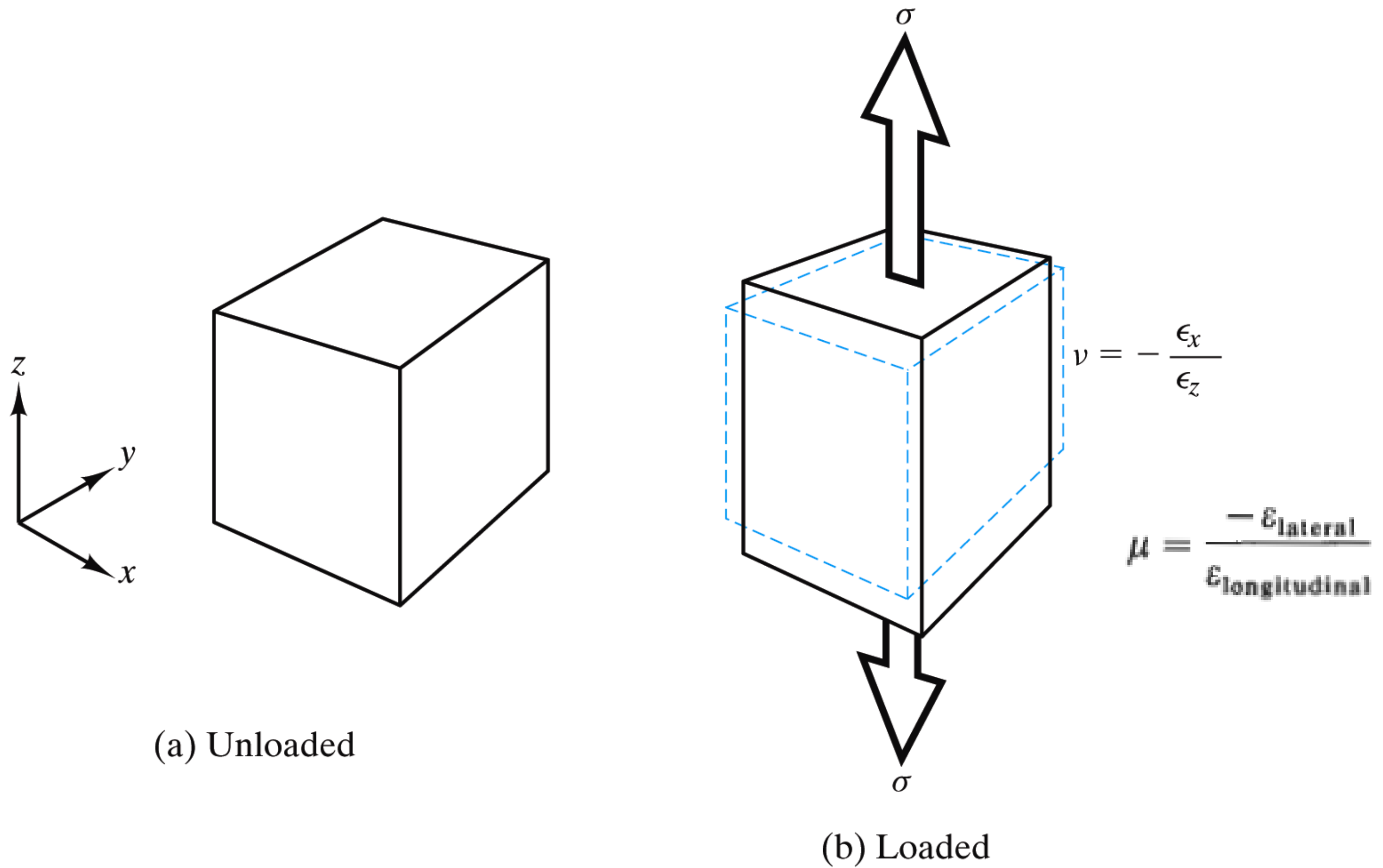


Figure 6.11

The Poisson's ratio (ν) characterizes the contraction perpendicular to the extension caused by a tensile stress.

Introduction to Materials Science for Engineers, Sixth Edition by James F. Shackelford.
ISBN 0-13-1-42486-6.

	Alloy	ν	G (GPa)	G/E
1.	1040 carbon steel	0.30		
2.	8630 carbon steel	0.30		
3.	a. 304 stainless steel	0.29		
6.	b. Ductile iron, 60–40–18	0.29		
7.	a. 3003-H14 aluminum	0.33	25	0.36
8.	a. AZ31B magnesium	0.35	17	0.38
	b. AM100A casting magnesium	0.35		
9.	a. Ti–5Al–2.5Sn	0.35	48	0.44
	b. Ti–6Al–4V	0.33	41	0.38
10.	Aluminum bronze, 9% (copper alloy)	0.33	44	0.40
11.	Monel 400 (nickel alloy)	0.32		

Table 6.4

Poisson's Ratio and Shear Modulus for the Alloys of Table 6.1.

Tabla 6.1 Módulos de elasticidad y de cizalladura a temperatura ambiente y coeficiente de Poisson para varios metales y aleaciones

Metal o aleación	*Módulo de elasticidad*		*Módulo de cizalladura*		*Coeficiente de Poisson*
	psi × 10^6	*MPa × 10^4*	*psi × 10^6*	*MPa × 10^4*	
Aluminio	10,0	6,9	3,8	2,6	0,33
Latón	14,6	10,1	5,4	3,7	0,35
Cobre	16,0	11,0	6,7	4,6	0,35
Magnesio	6,5	4,5	2,5	1,7	0,29
Níquel	30,0	20,7	11,0	7,6	0,31
Acero	30,0	20,7	12,0	8,3	0,27
Titanio	15,5	10,7	6,5	4,5	0,36
Tungsteno	59,0	40,7	23,2	16,0	0,28

Tabla 1.- Módulos de elasticidad y cizalladura a temperatura ambiente y coeficiente de Poisson para varios metales y aleaciones.

ISBN

l.

Dureza

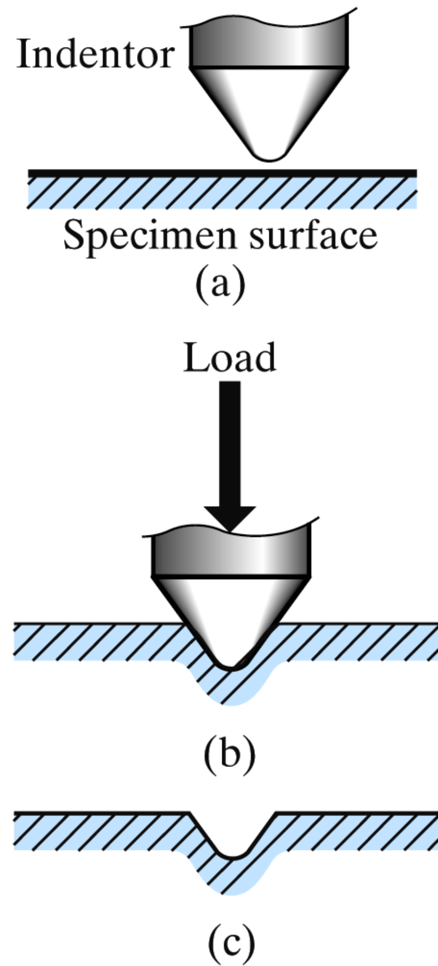


Figure 6.27

Hardness test. The analysis of indentation geometry is summarized in Table 6.10.

Introduction to Materials Science for Engineers, Sixth Edition by James F. Shackelford.

Test	Indenter	Shape of indentation: Side view	Shape of indentation: Top view	Load	Formula for hardness number
Brinell	10 mm sphere of steel or tungsten carbide	D, d	d	P	$\text{BHN} = \dfrac{2P}{\pi D\left[D - \sqrt{D^2 - d^2}\right]}$
Vickers	Diamond pyramid	136°	d_1, d_1	P	$\text{VHN} = 1.72P/d_1^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid	t; $l/b = 7.11$; $b/t = 4.00$	b, l	P	$\text{KHN} = 14.2P/l^2$
Rockwell					
A, C, D	Diamond cone	120°, t		60 kg, 150 kg, 100 kg	$R_A =$, $R_C =$, $R_D =$ } $100 - 500t$
B, F, G	$\frac{1}{16}$ in. diameter steel sphere	t		100 kg, 60 kg, 150 kg	$R_B =$, $R_F =$, $R_G =$ } $130 - 500t$
E, H	$\frac{1}{8}$ in. diameter steel sphere			100 kg, 60 kg	$R_E =$, $R_H =$ } $130 - 500t$

Source: H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. 3: *Mechanical Behavior*, John Wiley & Sons, Inc., NY, 1965.

Table 6.10

Common Types of Hardness- Test Geometries.

COMPARACION DE ENSAYOS TIPICOS DE DUREZA

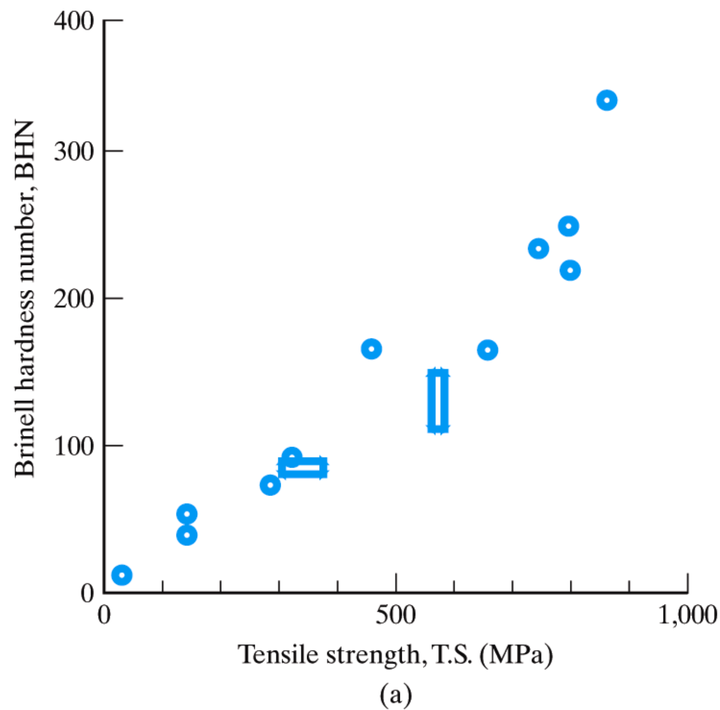
TABLE 6-5 ■ ***Comparison of typical hardness tests***

Test	Indentor	Load	Application
Brinell	10-mm ball	3000 kg	Cast iron and steel
Brinell	10-mm ball	500 kg	Nonferrous alloys
Rockwell *A*	Brale	60 kg	Very hard materials
Rockwell *B*	1/16-in. ball	100 kg	Brass, low-strength steel
Rockwell *C*	Brale	150 kg	High-strength steel
Rockwell *D*	Brale	100 kg	High-strength steel
Rockwell *E*	1/8-in. ball	100 kg	Very soft materials
Rockwell *F*	1/16-in. ball	60 kg	Aluminum, soft materials
Vickers	Diamond pyramid	10 kg	All materials
Knoop	Diamond pyramid	500 g	All materials

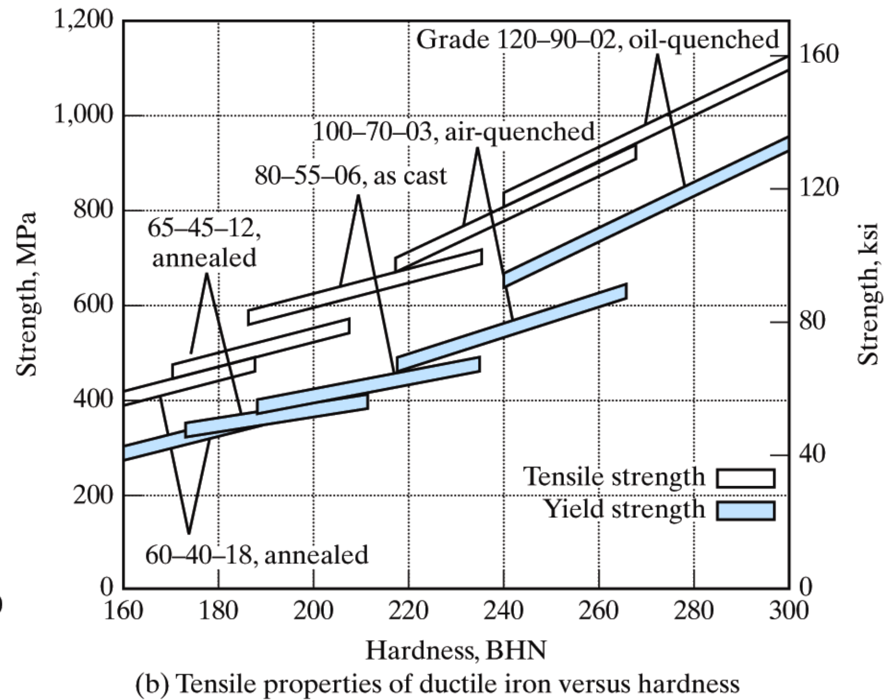
	Alloy	BHN	T.S. (MPa)
1.	1040 carbon steel	235	750
2.	8630 low-alloy steel	220	800
3.	c. 410 stainless steel	250	800
5.	Ferrous superalloy (410)	250	800
6.	b. Ductile iron, 60–40–18	167	461
7.	a. 3003-H14 aluminum	40	150
8.	a. AZ31B magnesium	73	290
	b. AM100A casting magnesium	53	150
9.	a. Ti–5Al–2.5Sn	335	862
10.	Aluminum bronze, 9% (copper alloy)	165	652
11.	Monel 400 (nickel alloy)	110–150	579
12.	AC41A zinc	91	328
13.	50:50 solder (lead alloy)	14.5	42
15.	Dental gold alloy (precious metal)	80–90	310–380

Table 6.11

Comparison of Brinell Hardness Numbers (BHN) with Tensile Strength (T.S.) for the Alloys of Table 6.1.



(a)

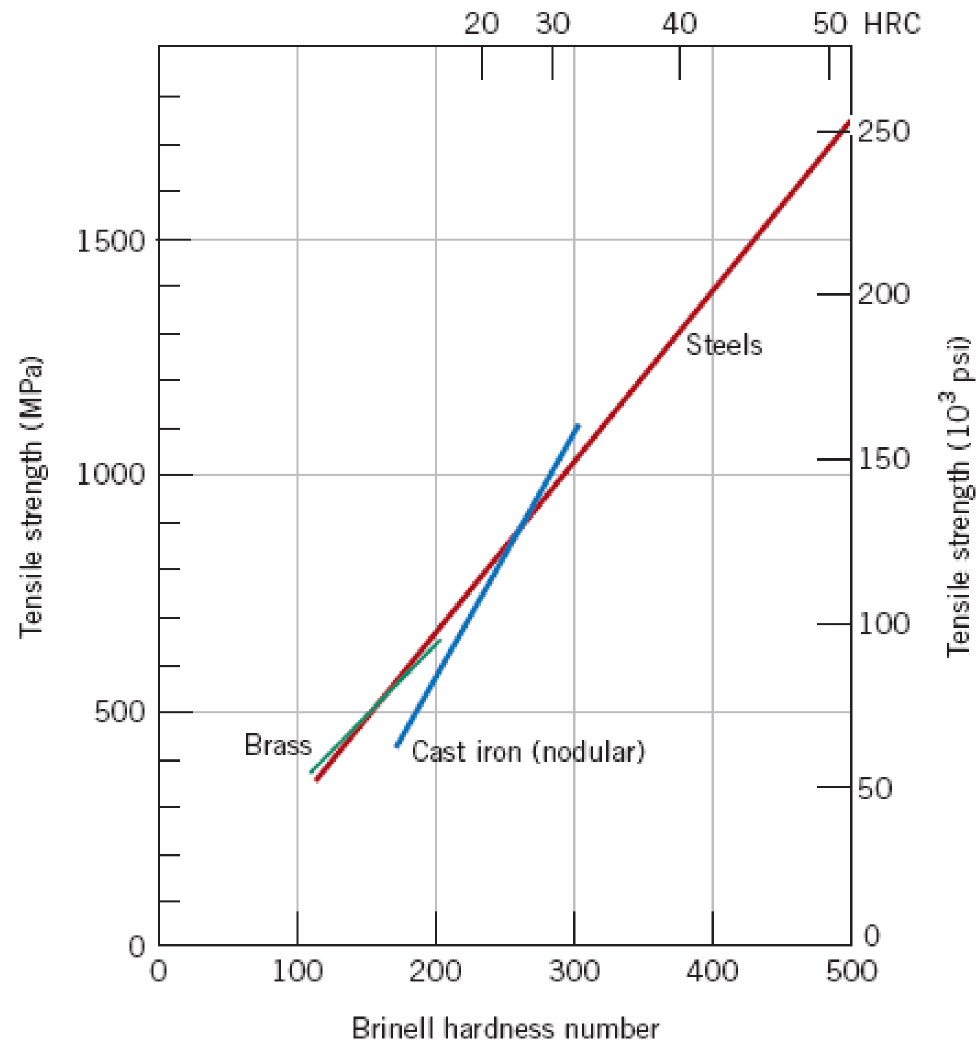


(b) Tensile properties of ductile iron versus hardness

Figure 6.28

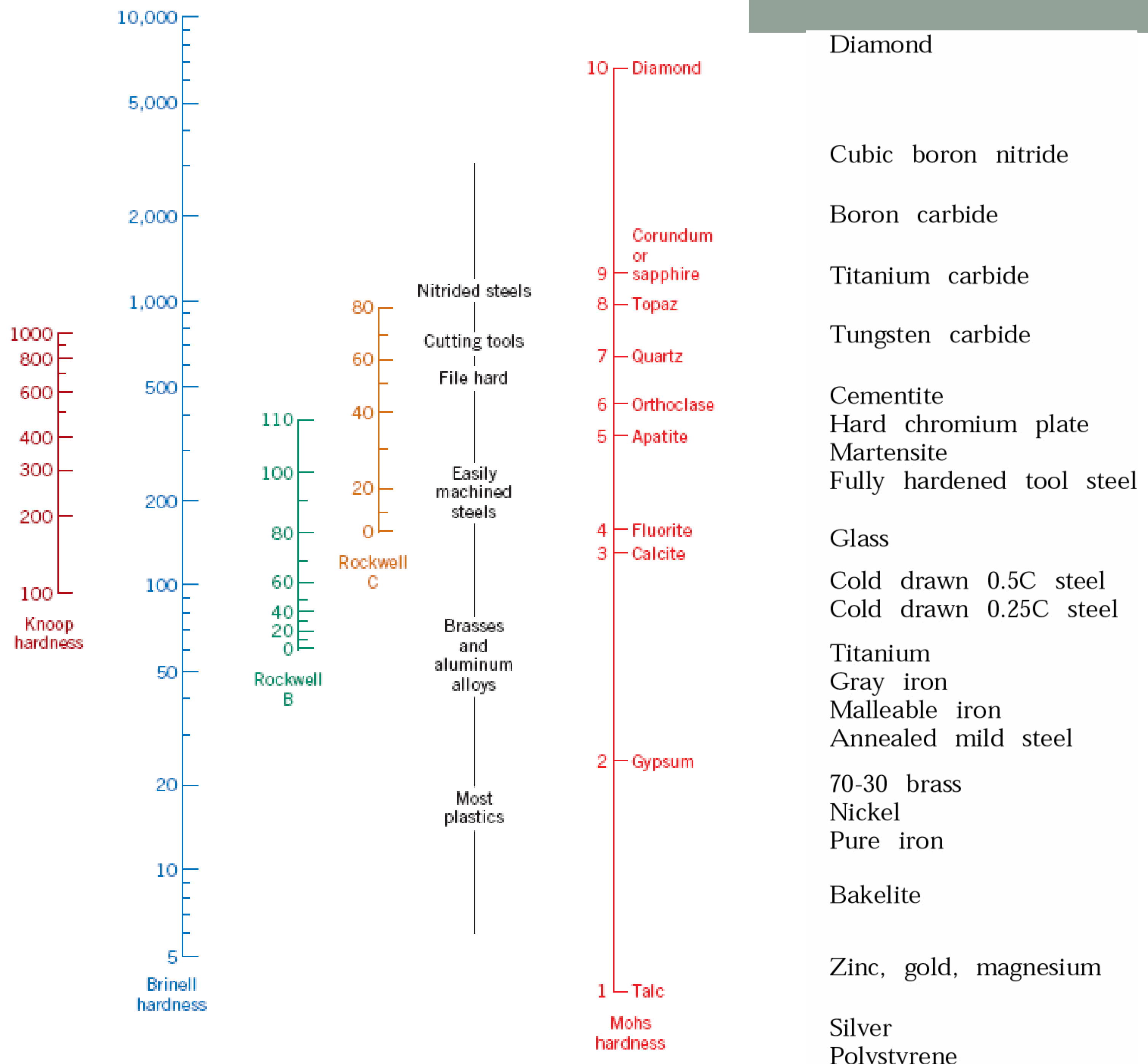
(a) Plot of data from Table 6.11. A general trend of BHN with T.S. is shown. (b) A more precise correlation of BHN with T.S. (or Y.S.) is obtained for given families of alloys. [Part (b) from Metals Handbook, *9th ed., Vol. 1,* American Society for Metals, *Metals Park, OH, 1978.]*

$$TS(psi) = 500\,HB$$



20
30
40
50
HRC
1500
1000
500
0
250
200
150
100
50
0
Steels
Brass
Cast iron (nodular)
Tensile strength (MPa)
Tensile strength (10³ psi)
0
100
200
300
400
500
Brinell hardness number

Figure 6.18 Comparison of several hardness scales. (Adapted from G. F. Kinney, *Engineering Properties and Applications of Plastics*, p. 202. opyright © 1957 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)



Diamond

Cubic boron nitride

Boron carbide

Titanium carbide

Tungsten carbide

Cementite
Hard chromium plate
Martensite
Fully hardened tool steel

Glass

Cold drawn 0.5C steel
Cold drawn 0.25C steel

Titanium
Gray iron
Malleable iron
Annealed mild steel

70-30 brass
Nickel
Pure iron

Bakelite

Zinc, gold, magnesium

Silver
Polystyrene

Hardness [GPa]

100

80

60

40

20

0

Diamond Films

nc-TiN/Si_3N_4 1999

1998

nc-TiN/BN

1997

TiN/Si_3N_4 1995

c-BN

Multilayers

C_3N_4

a-C:H

TiN

WC

SiC

α-Al_2O_3

steel



Stan Veprek. J. Vac. Sci. Technol. A 17(5) Sep/Oct 1999

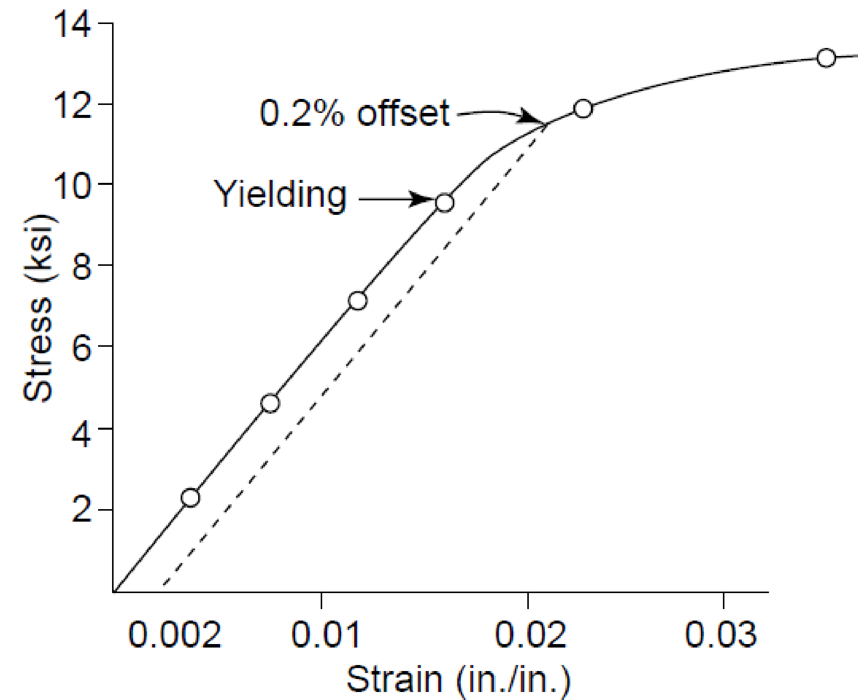
The following data were collected from a 0.4-in. diameter test specimen of polyvinyl chloride (lo = 2.0 in.):

$$\sigma = F/(\pi/4)(0.4)^2 = F/0.1257$$

$$\varepsilon = (\ell - 2)/2$$

Load (lb)	Gage Length (in.)	Stress (psi)	Strain (in./in.)
0	2.00000	0	0.0
300	2.00746	2,387	0.00373
600	2.01496	4,773	0.00748
900	2.02374	7,160	0.01187
1200	2.032	9,547	0.016
1500	2.046	11,933	0.023
1660	2.070 (max load)	13,206	0.035
1600	2.094	12,729	0.047
1420	2.12 (fracture)	11,297	0.06

After fracture, the gage length is 2.09 in. and the diameter is 0.393 in. Plot the data and calculate (a) the 0.2% offset yield strength, (b) the tensile strength, (c) the modulus of elasticity, (d) the %Elongation, (e) the %Reduction in area, (f) the engineering stress at fracture, (g) the true stress at fracture, and (h) the modulus of resilience.



(a) 0.2% offset yield strength = 11,600 psi

(b) tensile strength = 12,729 psi

(c) $E = (7160 - 0) / (0.01187 - 0) = 603{,}000$ psi

(d) $\%\text{Elongation} = \dfrac{(2.09 - 2)}{2} \times 100 = 4.5\%$

(e) $\%\text{Reduction in area} = \dfrac{(\pi/4)(0.4)^2 - (\pi/4)(0.393)^2}{(\pi/4)(0.4)^2} \times 100 = 3.5\%$

(f) engineering stress at fracture = 11,297 psi

(g) true stress at fracture = 1420 lb / $(\pi/4)(0.393)^2$ = 11,706 psi

(h) From the figure, yielding begins near 9550 psi. Thus:

½(yield strength)(strain at yield) = ½(9550)(0.016) = 76.4 psi

- Taller 1c

Bibliografía

• ASHBY, MICHAEL F.	Engineering Materials 1 - An introduction to properties, applications and design.	ELSEVIER Pergamon Press. Oxford.	2012
• ASHBY, MICHAEL F.	Engineering Materials 2 - An introduction to microstructures and processing.	ELSEVIER Pergamon Press. Oxford.	2012
• ASHBY, MICHAEL F.	Materials selection in mechanical design.	ELSEVIER Pergamon Press. Oxford.	2005
• MANGONON, PAT L.	Ciencia de materiales.	PRENTICE HALL	2001
• CALLISTER, WILLIAM D.	Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales.	REVERTE	1997
• SMITH WILLIAM F.	Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales	MC GRAW HILL	1999
• AVNER	Introducción a la metalurgia física, Manual de normas	MC GRAW HILL	
• Charles & Crane	Selection and use of engineering materials.	BUTTERWORTH HEINEMANN LTD, WILTSHIRE	1989
• BOLTON	Materials and their uses	BUTTERWORTH HEINEMANN LTD, OXFORD	1996
• EASTERLING	Tomorrow materials.	The institute of metals, London	1988
• MUNZ	Caramic materials: Mechanical properties, failure behaviour and materials selection.	Springer	2001
• BUDINSKI	Engineering materials: properties and selection.	PRENTICE HALL	2004

Bibliografía

Bibliografía actualizada de los siguientes textos:

1. - Ciencia e Ingeniería de Materiales, William Smith
2. - Ciencia i. e ingeniería. de los materiales. Donald Askelan
3. - I n t r o d u c c i ó n a l a Ciencia e Ingeniería de los Materiales. W i l l ik m d C a l l i s t e r
4. Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros para, 6 ta edición, Shackelford
5. - Introducción a la Física del Estado Sólido, Charles Kittel
6. - Introducción a la Metalurgia Física. Sydney Avner

Otros:

Google.

http://xplociencias.wordpress.com/2013/03/22/grafeno-el-material-mas-fuerte-jamas-visto-podria-tener-aplicacion-en-la-industria-alimentaria/

http://quimicanaturaleza.blogspot.com/2013/07/grafeno-ventajas-y-desventajas.html

Y. Zhao, I.C. Cheng, M.E. Kassner, A.M. Hodge. The effect of nanotwins on the corrosion behavior of copper. Acta Materialia 67 (2014) 181–188.

Di Xu, Vinay Sriram, Vidvuds Ozolins, Jenn-Ming Yang, K.N. Tu, Gery R. Stafford, Carlos Beauchamp, Inka Zienert, Holm Geisler, Petra Hofmann, Ehrenfried Zschech. Nanotwin formation and its physical properties and effect on reliability of copper interconnects. Microelectronic Engineering 85 (2008) 2155–2158.

Yifu Zhao, Timothy Allen Furnish, Michael Ernest Kassner, and Andrea Maria Hodge. Thermal stability of highly nanotwinned copper: The role of grain boundaries and texture. J. Mater. Res., Vol. 27, No. 24, Dec 28, 2012.

Dao, M., Lu, L., Shen, Y. F., & Suresh, S. (2006). Strength, strain-rate sensitivity and ductility of copper with nanoscale twins. Acta Materialia, 54(20), 5421–5432.

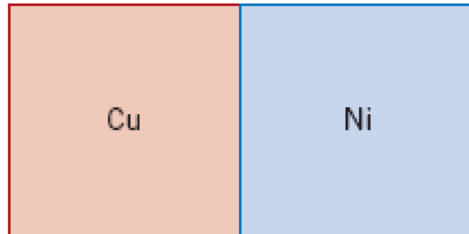
Twin stability in highly nanotwinned Cu under compression, torsion and tension, Scrita Materialia, 66 (2012) 872-877

Enhanced hardening in Cu/330 stainless steel multilayers, Acta Materialia 52 (2004) 995–1002 by nanoscale twinning

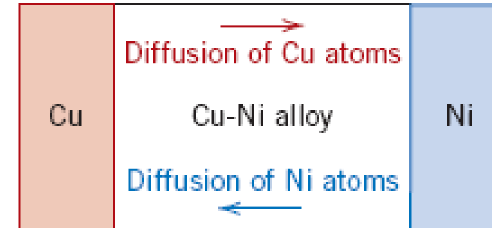
Tensile behavior of columnar grained Cu with preferentially oriented nanoscale twins, acta material, 59, (2011) 2927.

DIFUSIÓN: Flujo neto de iones, átomos, electrones, vacancias y moléculas

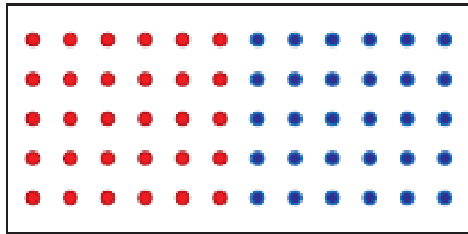
Después de un tratamiento térmico



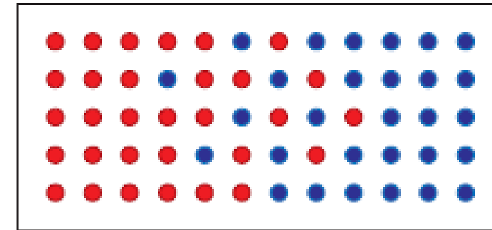
(a)



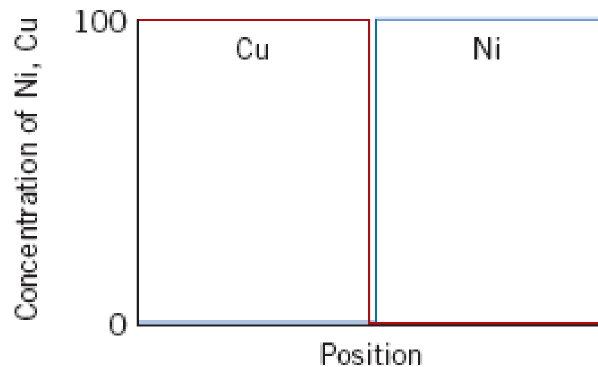
(a)



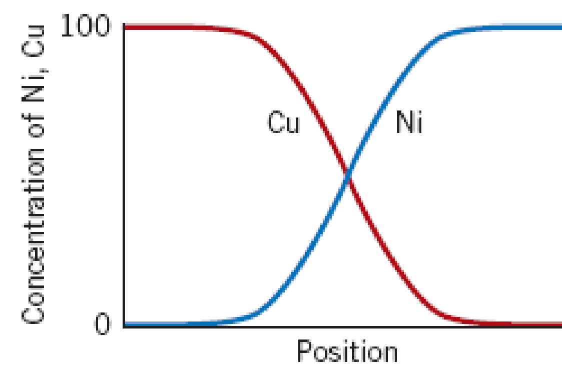
(b)



(b)



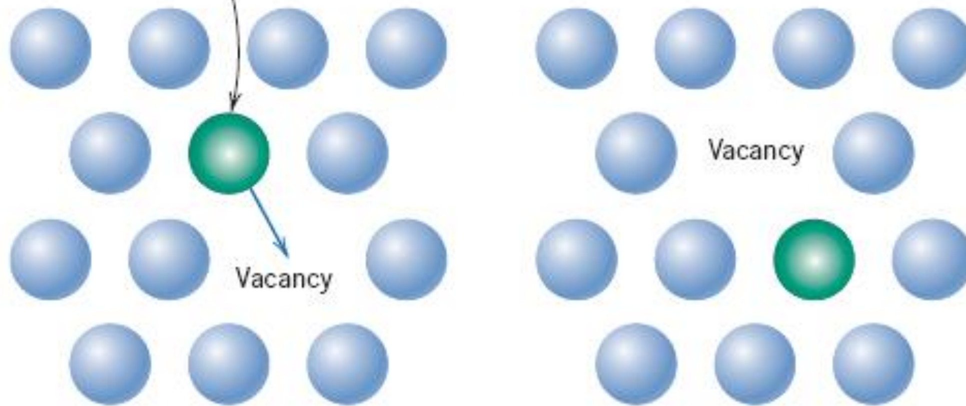
(c)

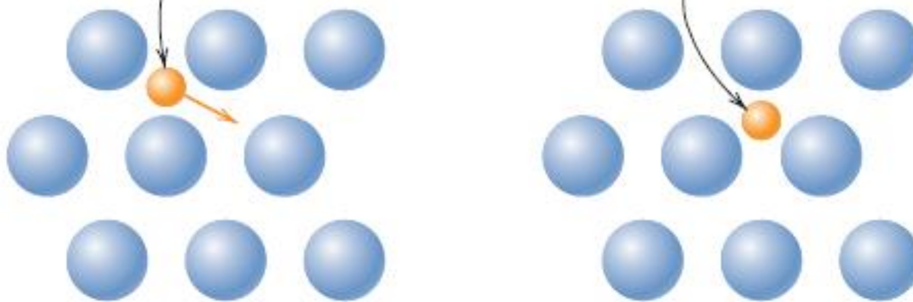


(c)

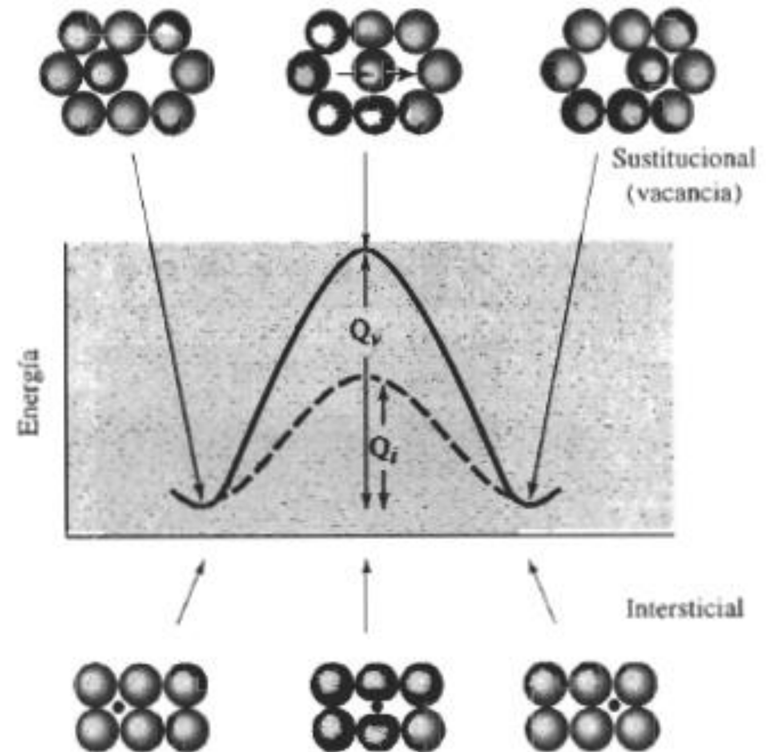
MECANISMOS DE DIFUSIÓN

Difusión de vacancias



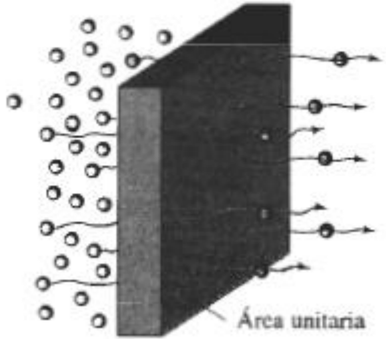


Difusión intersticial
Se difunden con mayor facilidad



Variación de la energía libre como función de la posición de un átomo intersticial o la vacancia.

DIFUSIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO



$$J = \frac{M}{At}$$

Flujo constante

Velocidad de difusión o de transferencia de masa

No depende de la Temperatura

J es Densidad de Flujo

$$= \frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{C_A - C_B}{x_A - x_B}$$

El gradiente de concentración dC/dx conocido y e invariable con el tiempo.

$$J = -D\frac{dC}{dx}$$

La dirección de difusión es contraria al gradiente de concentración (desde elevada conc. a baja conc.

$$J\left(\frac{Atomos}{m^2.s}\right) = D\left(\frac{m^2}{s}\right).\frac{dC}{dx}\left(\frac{Atomos}{m^3}.\frac{1}{m}\right)$$

Masa que se difunde perpendicularmente en una sección transversal de área A por unidad de tiempo.

$P_A > P_B$ and constant

Thin metal plate

Gas at pressure P_B

Gas at pressure P_A

Direction of diffusion of gaseous species

$\frac{dC}{dx}$

Se aumenta el gradiente, es decir la difusión se incrementa.

Concentración 1

$\frac{dC}{dx}$

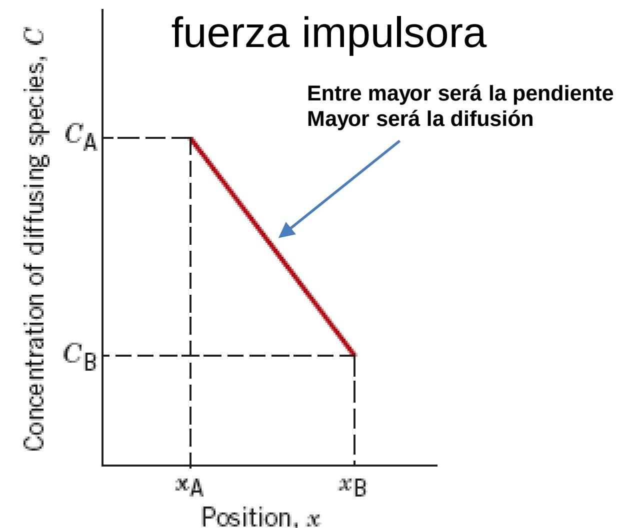
Concentración 2

Area, A

En el equilibrio el gradiente de concentración es invariable con el tiempo

(a)

El gradiente de concentración de la sustancia difusiva es la fuerza impulsora



(b)

DIFUSIÓN EN ESTADO NO ESTACIONARIO

Perfil de composición

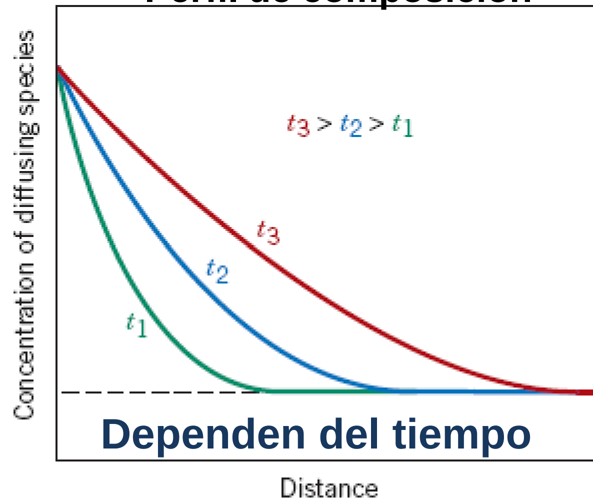


Figure 5.5 Concentration profiles for nonsteady-state diffusion taken at three different times, t_1, t_2, and t_3.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

La densidad de flujo y el gradiente del mismo varían con el tiempo, generando la acumulación o el agotamiento de las sustancias que se difunden.

Con mayor tiempo se encuentra mayor profundidad de las especies difundidas

Concentración en función de la posición y el tiempo.

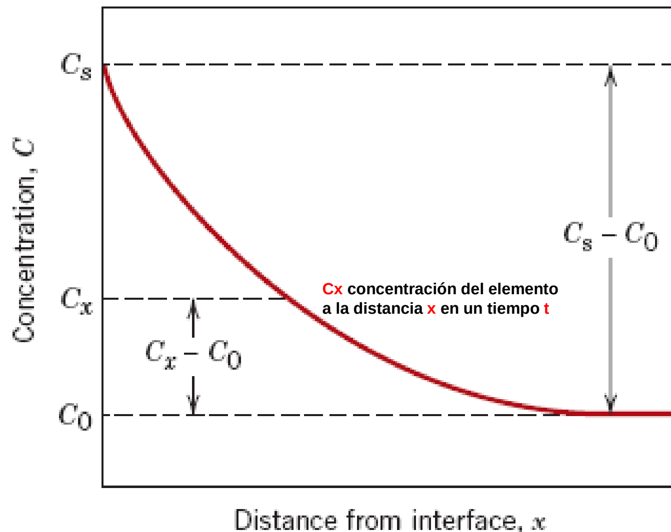


Figure 5.6 Concentration profile for nonsteady-state diffusion; concentration parameters relate to Equation 5.5.

Es importante estudiar el flujo de difusión en función del tiempo.

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

Cs es una concentración constante de átomos que se difunden en la superficie del material . Co es la concentración inicial de átomos, Cx es la concentración en una lugar x. X es cero en la superficie y aumenta hacia dentro del material.

1. Antes de la difusión, los átomos están uniformemente distribuidos en el sólido con una concentración Co.
2. El valor de x en la superficie es cero y aumenta con la distancia dentro del sólido
3. Se considera que el tiempo antes de que empiece la difusión es cero.

$$\frac{C_1 - C_0}{C_s - C_0} = \text{constant} \qquad \frac{x}{2\sqrt{Dt}} = \text{constant} \qquad \frac{x^2}{Dt} = \text{constant}$$

FACTORES QUE AFECTAN LA DIFUSIÓN

Diffusing Species	Host Metal	$D_0(m^2/s)$	Activation Energy Q_d		Calculated Values	
			kJ/mol	eV/atom	T(°C)	$D(m^2/s)$
Fe	α-Fe (BCC)	2.8×10^{-4}	251	2.60	500 900	3.0×10^{-21} 1.8×10^{-15}
Fe	γ-Fe (FCC)	5.0×10^{-5}	284	2.94	900 1100	1.1×10^{-17} 7.8×10^{-16}
C	α-Fe	6.2×10^{-7}	80	0.83	500 [illegible]	2.4×10^{-12} [illegible]
C	γ-Fe	2.3×10^{-5}	148	1.5[illegible]		
Cu	Cu	7.8×10^{-5}	211	2.1[illegible]		
Zn	Cu	2.4×10^{-5}	189	1.9[illegible]		
Al	Al	2.3×10^{-4}	144	1.4[illegible]		
Cu	Al	6.5×10^{-5}	136	1.41		
Mg	Al	1.2×10^{-4}	131	1.3[illegible]		
Cu	Ni	2.7×10^{-5}	256	2.6[illegible]		

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q_d}{RT}\right)$$

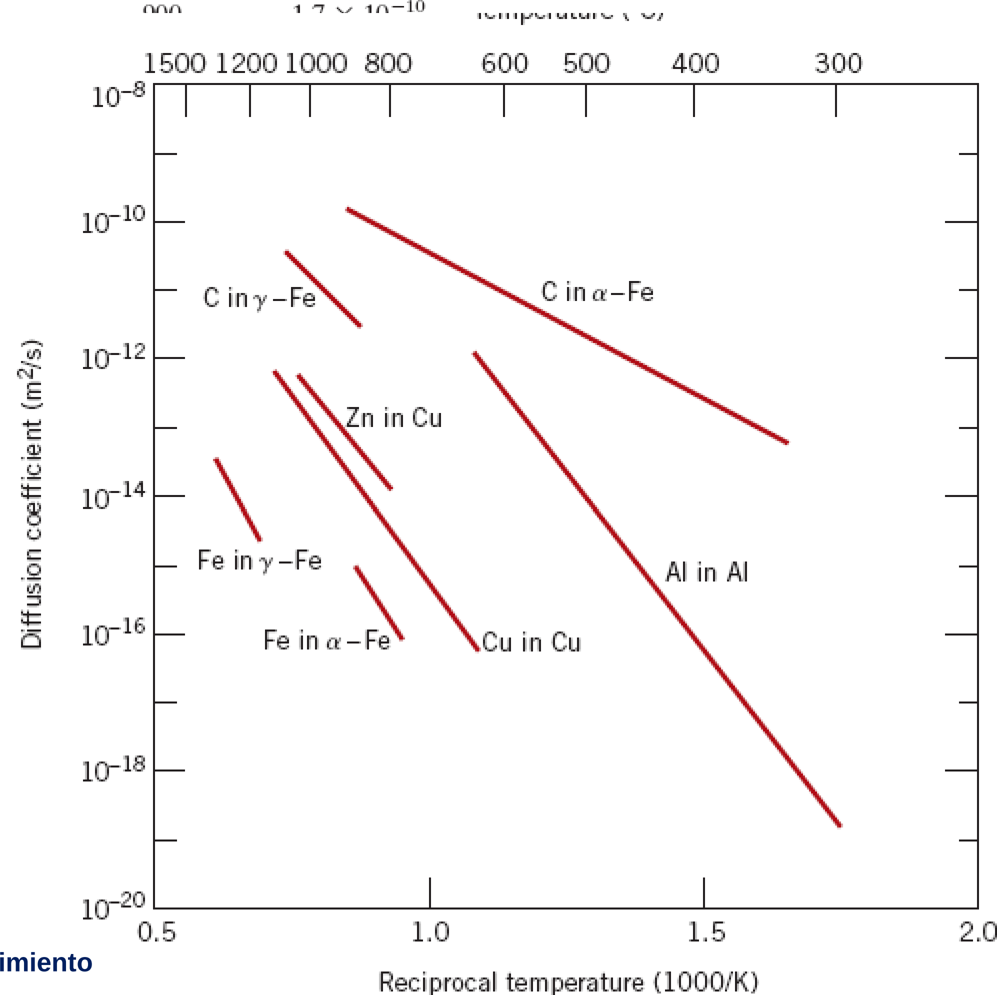
En función de la temperatura

$$\ln D = \ln D_0 - \frac{Q_d}{R}\left(\frac{1}{T}\right)$$

$$y = b + mx$$

Termino proexponencial
Similar a Co

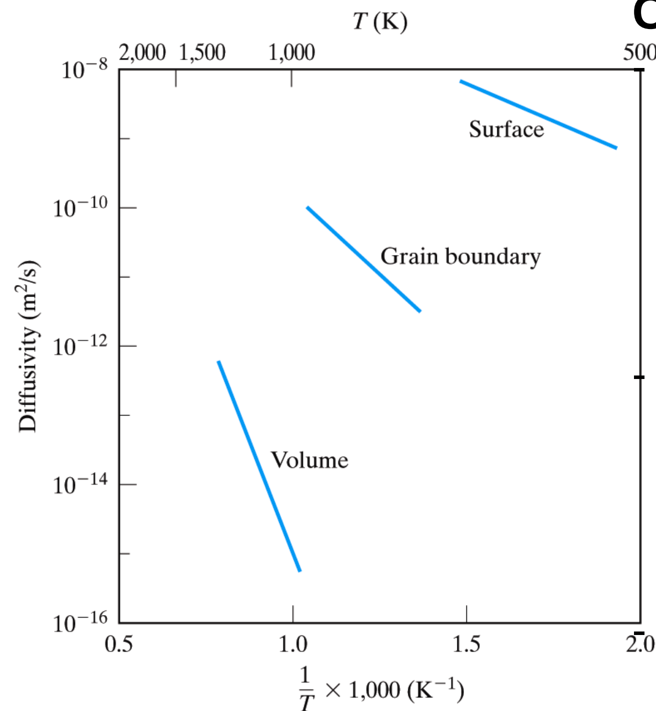
ordenada en y / pendiente



Do es un factor independiente de la temperatura, constante de proporcionalidad o termino proexponencial.

Qd es la energía de activación. Energía requerida para producir el movimiento difusivo de un mol de átomos. D bajos requieren altos valores de Qd.

Clases de difusión:



Volumétrica: Los átomos se mueven a través del cristal de un sitio reticular o intersticial a otro. La energía de activación es alta.
Difusión por los limites de grano; es fácil, se encuentra una estructura no ordenada. La energía de activación es baja.
Superficial: menos restricciones.

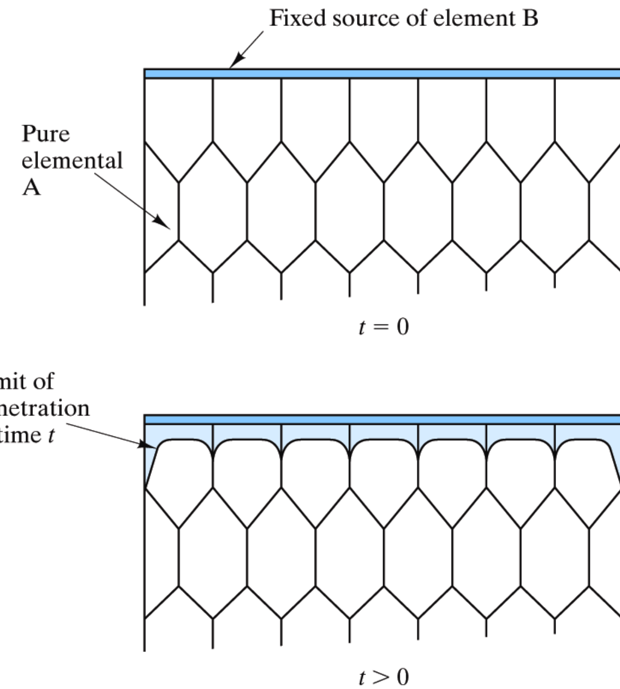
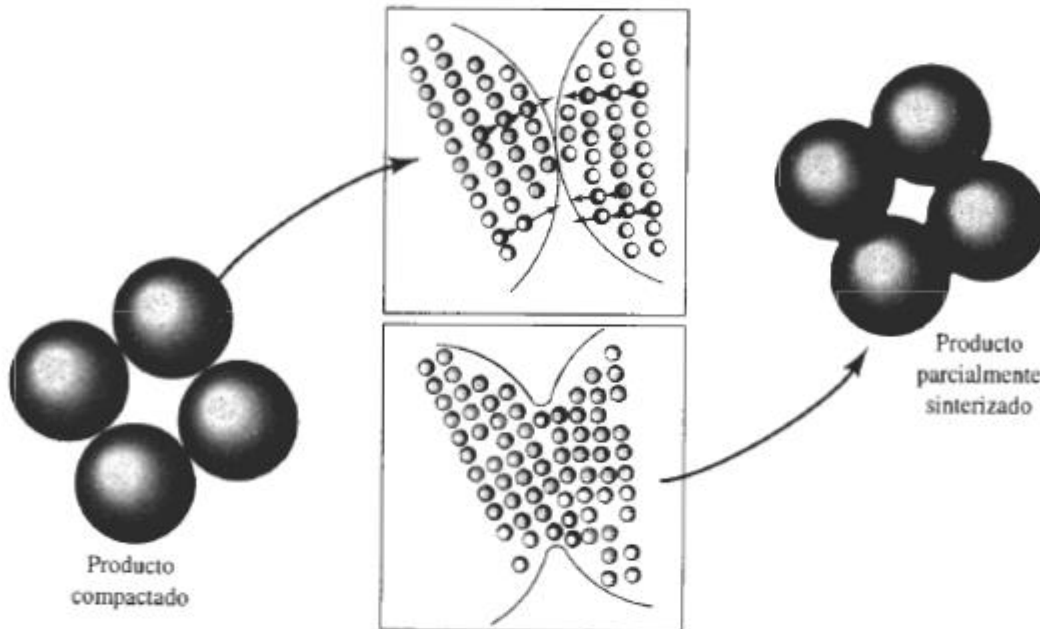


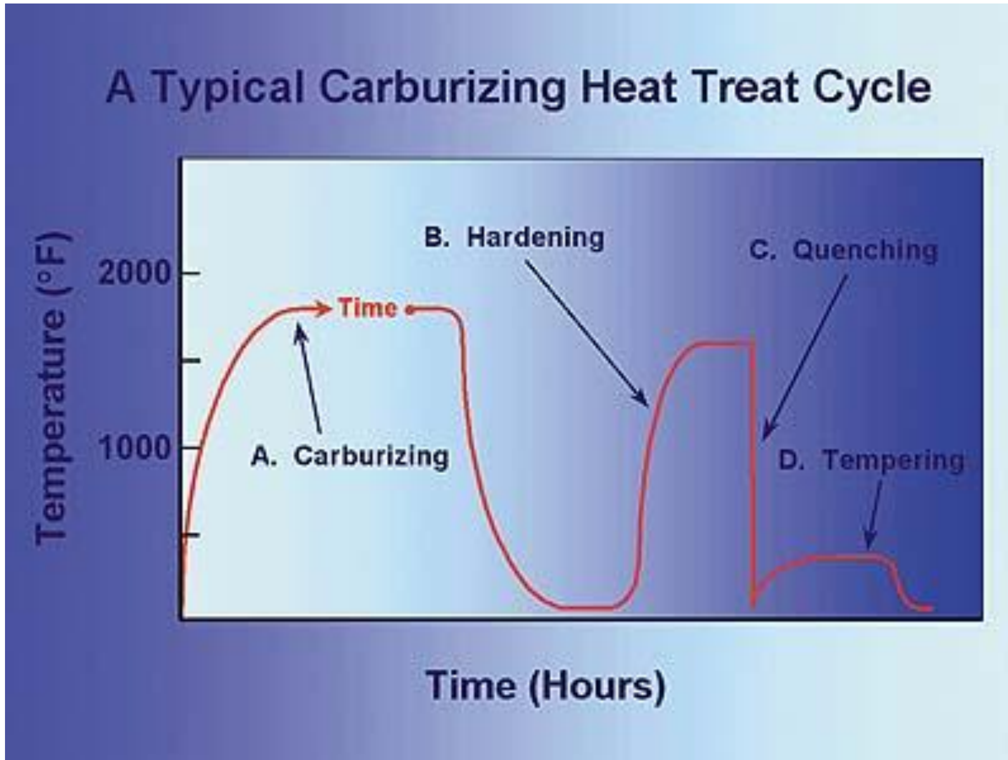
Figure 5.19

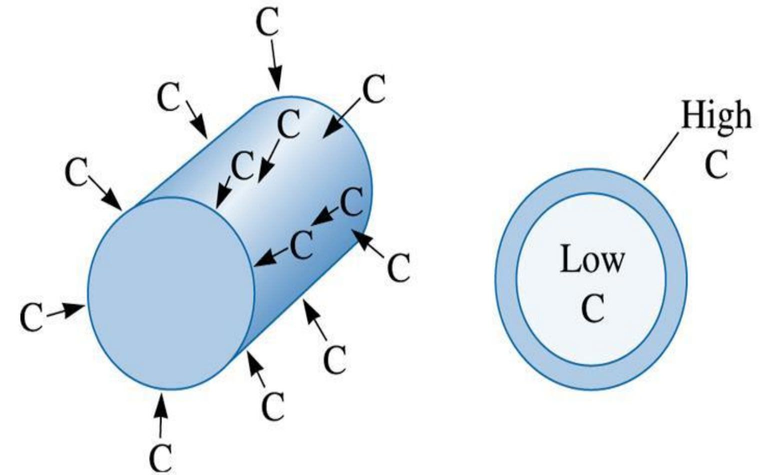
Schematic illustration of how a coating of impurity B can penetrate more deeply into grain boundaries and even further along a free surface of polycrystalline A, consistent with the relative values of diffusion coefficients ($D_{volume} < D_{grain\ boundary} < D_{surface}$).

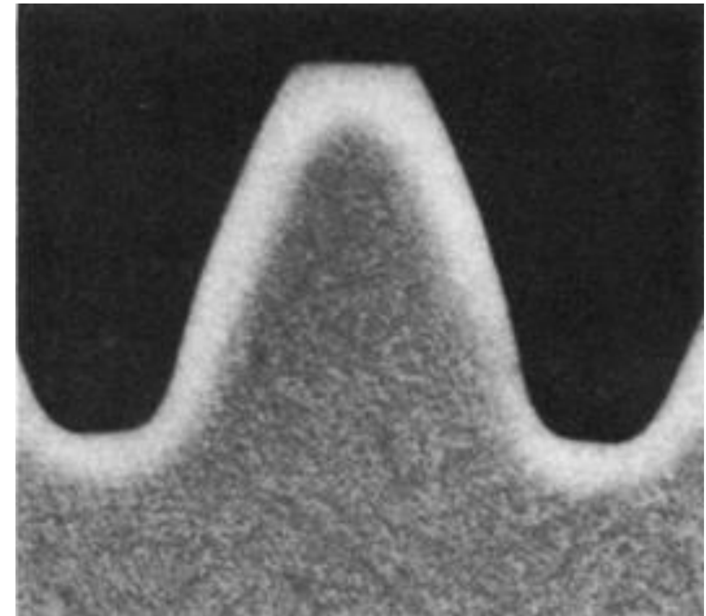


Ej 2: Los límites de grano son regiones de alta energía. Con el aumento del tamaño de grano se reduce la superficie de los límites de grano. Los granos mas grandes crecen a expensas de los menor tamaño. Los átomos se difunden en los límites de grano , los límites de grano también se difunden.

Carburizaciòn

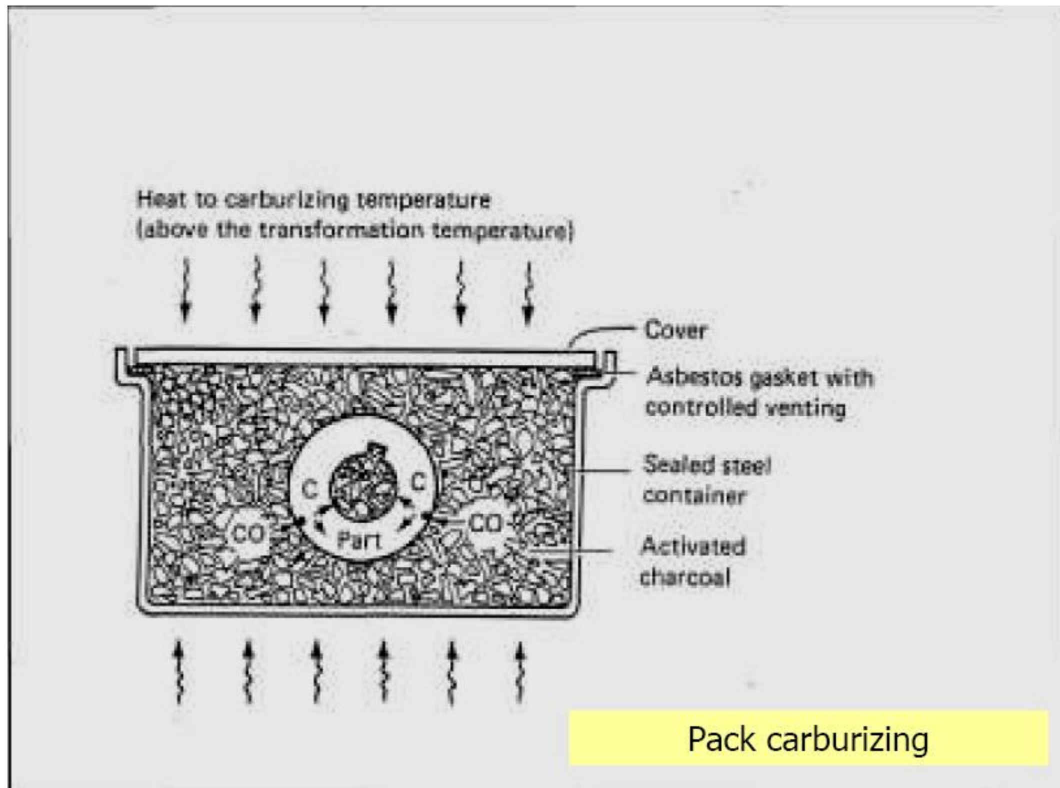






- Potencial de carbono (Pc).
- Actividad (Ac).
- Concentración de saturación (Cs).
- Velocidad de difusión (Vd).

Carburizaciòn sòlida



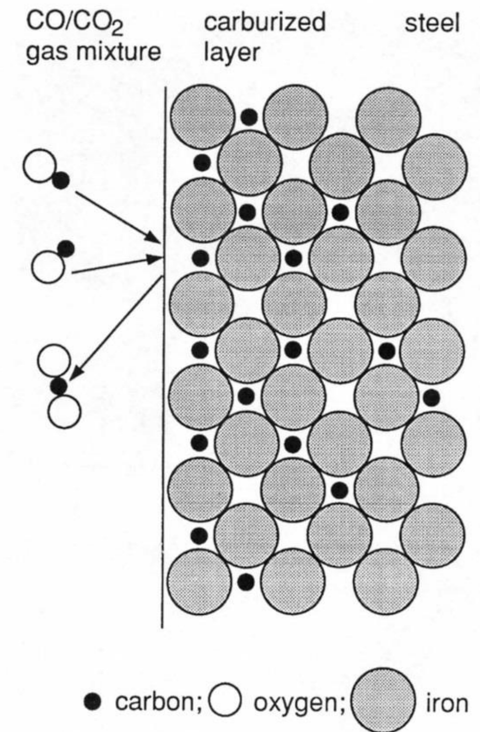
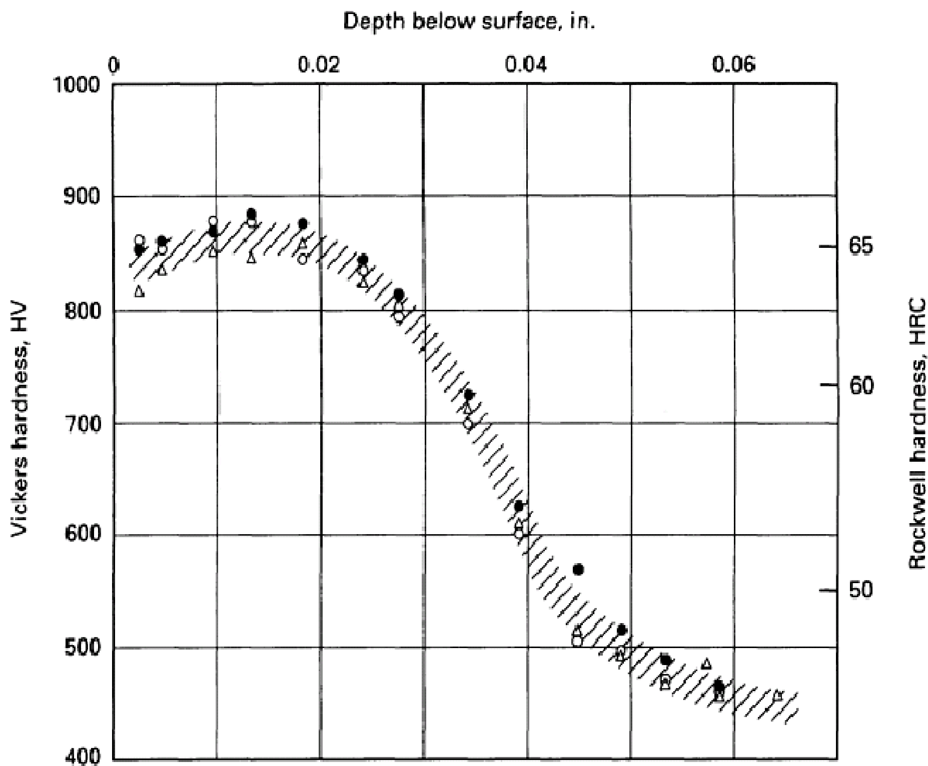
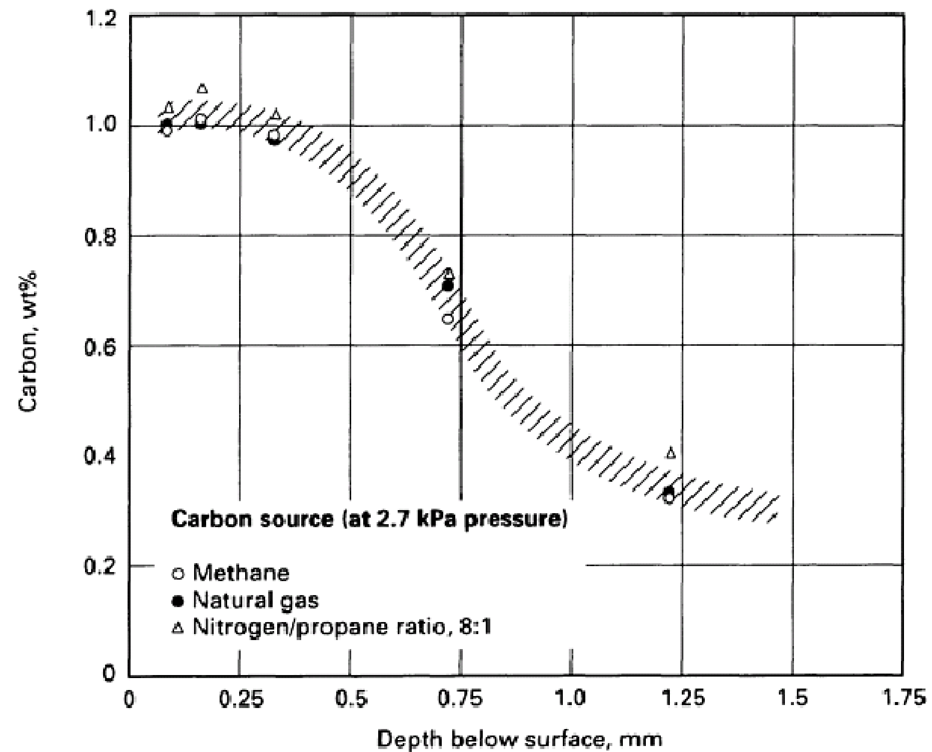


Fig. 6.3-2 Carburizing of a steel.

La cementación es un tratamiento termoquímico que se realiza al acero de bajo carbono (menos del 0.25%) que no está templado con el objetivo de enriquecer en carbono (mas del 0.8 %) la capa superficial. Consiste en someter la pieza a un ambiente rico en carbono elemental a altas temperaturas (900-950 ^{o}C), para que se produzca su difusión dentro del material de la pieza.

El núcleo, debido al bajo contenido de carbono, no admite temple, queda tenaz y puede trabajar bajo cargas dinámicas, y la zona periférica adquiera temple a una profundidad de cerca de 1 mm haciéndose resistente al desgaste .



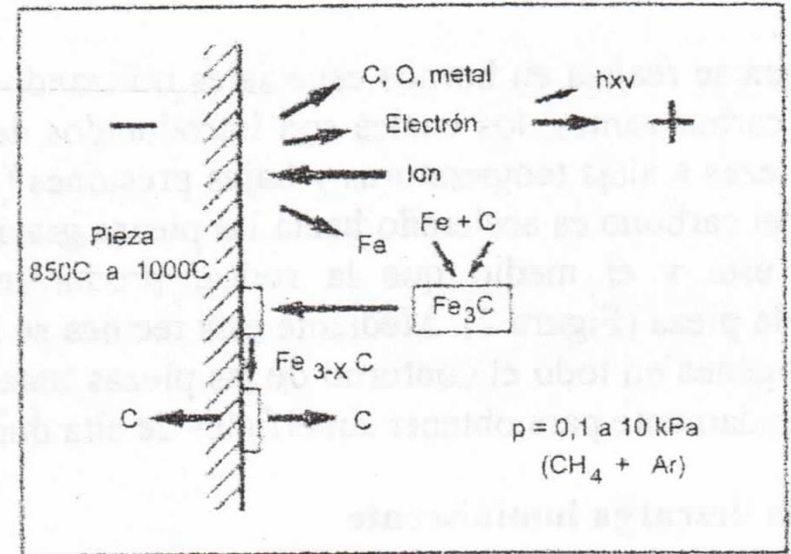


Perfiles de dureza y concentración de carbono en un acero AISI 1020 sometido a carburización por plasma utilizando diferentes gases a 1050˚C/10 min seguido de un proceso de difusión a 1000 ˚C/30 min.

Carburizaciòn por plasma

Proceso de carburización gaseosa

(a)	CH_4 (gas)	$\rightarrow$ adsorbed (ad) CH_4
(b)	CH_4 (ad)	$\rightarrow CH_3$ (ad) + H (ad)
(c)	CH_3 (ad)	$\rightarrow CH_2$ (ad) + H (ad)
(d)	CH_2 (ad)	$\rightarrow$ CH (ad) + H (ad)
(e)	CH (ad)	$\rightarrow$ CH (ad) + H (ad)
(f)	CH (ad)	$\rightarrow$ C (dissolved)





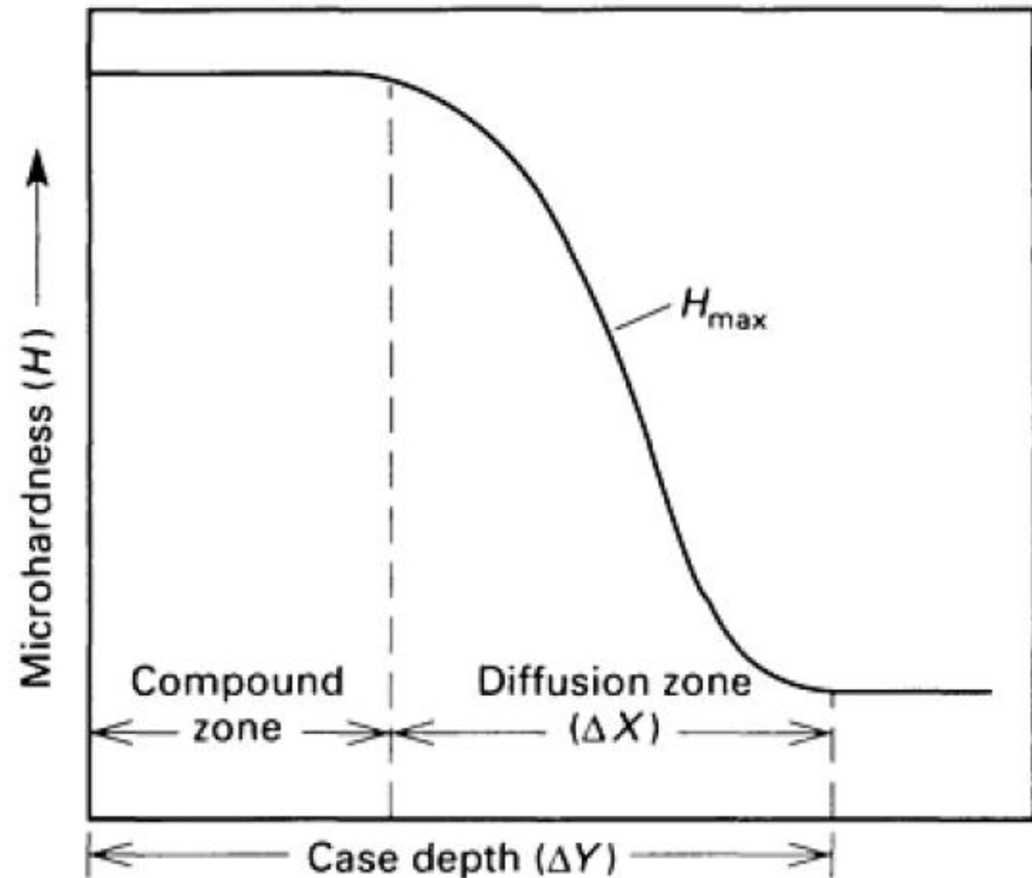
Carburización por plasma:
Todo el metano disponible
es disociado (en un solo paso)



Nitruraciòn

ESTRUCTURA Y FORMACIÓN

La estructura de un acero nitrurado incluye una zona de difusión con o sin zona compuesta, depende del tipo y concentración de la aleación así como del tiempo de ensayo, los gases, la temperatura, etc.



Altos valores de dureza (600-1000 Vickers).

Buena resistencia ante el ataque corrosivo.

No requiere de un enfriamiento rápido para lograr endurecimiento.

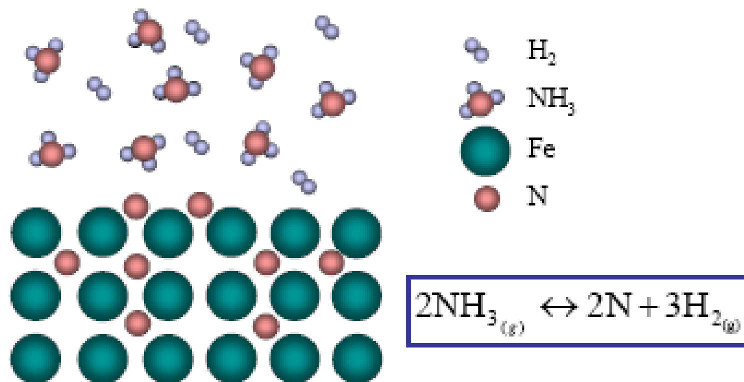
La microestructura inicial influye significativamente en los resultados finales de la nitruración.

No requiere de un temple para endurecer la capa producida, evitando así distorsiones en el núcleo.

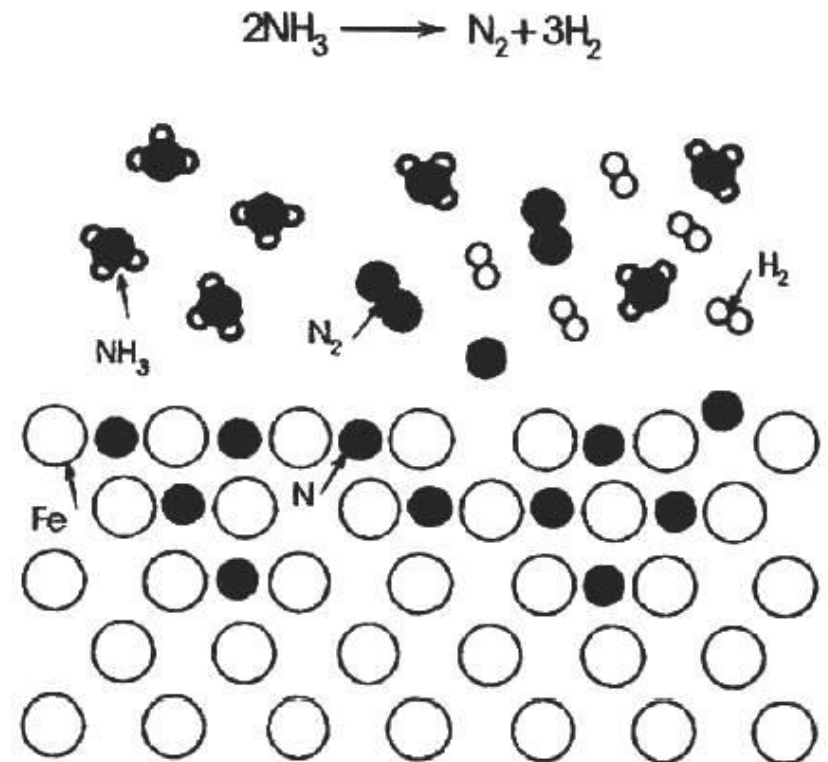
Espesor 5- 50 *u*m

Nitruraciòn Gaseosa con o sin vacìo

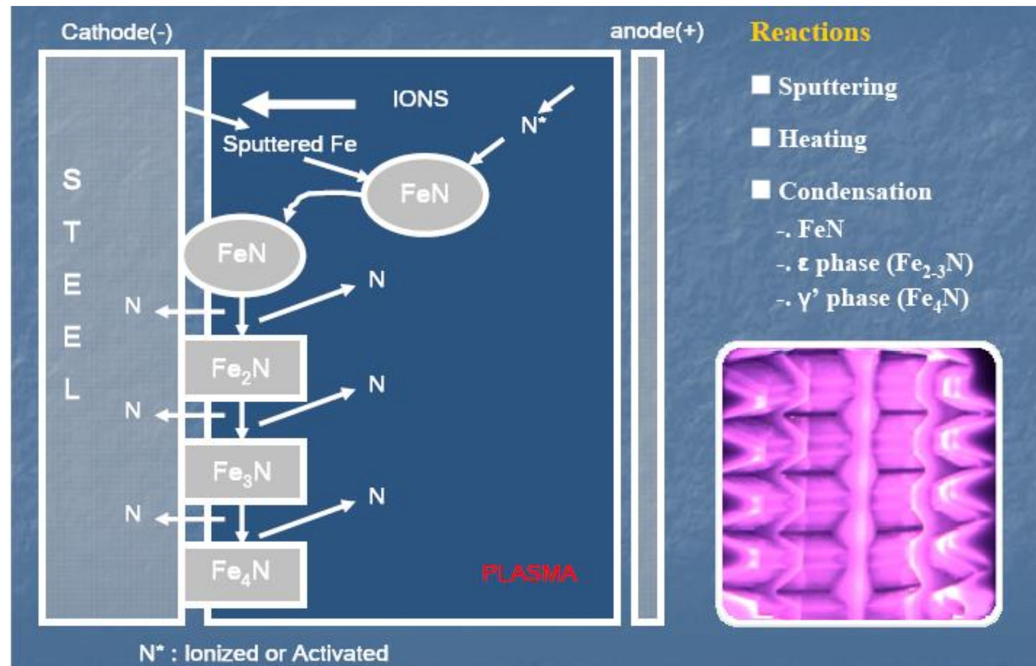
Gas nitriding



Schematic illustration of nitriding of a steel by using ammonia gas

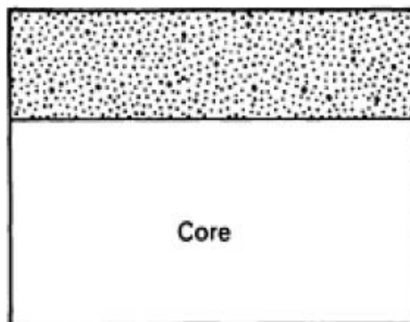


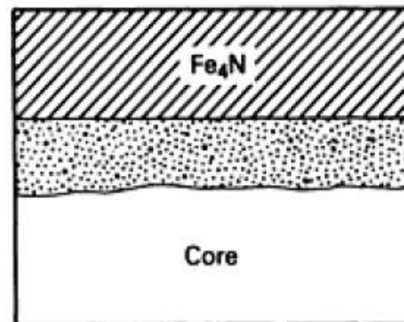
Nitruraciòn por plasma

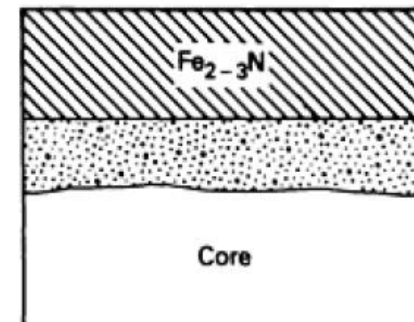




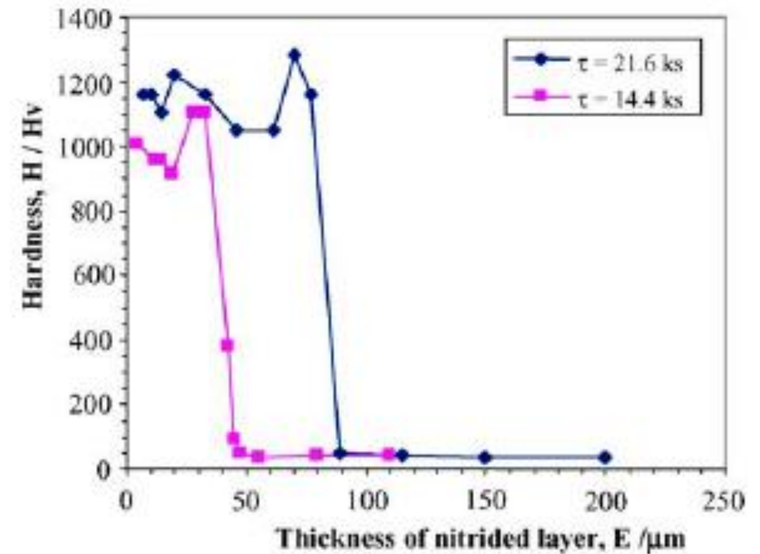
Gas composition

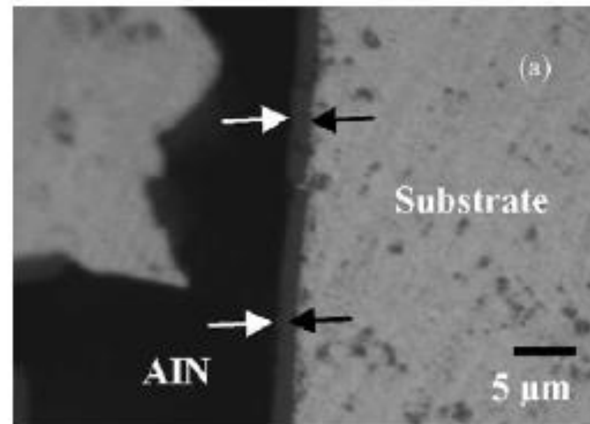


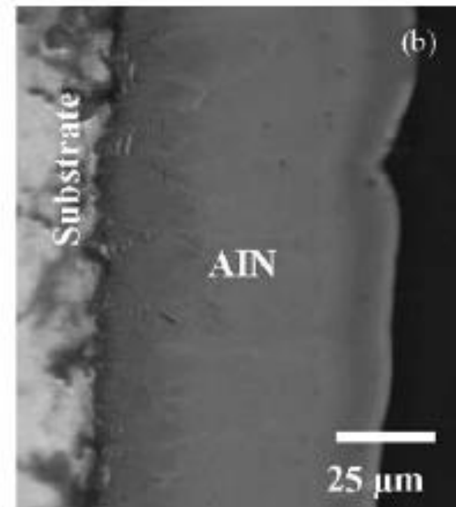




Typical normal plasma nitriding and pre-sputtering conditions	
Specimen temperature, *T* (K)	723–873
Holding time, *τ* (ks)	
Pre-sputtering	3.6–18
Nitriding	7.2–25.2
Pressure in chamber, *P* (Pa)	
Base pressure	0.13–4.00
Pre-sputtering pressure	133.3
Nitriding pressure	532.0
Gas ratio	75% H_2–25% N_2





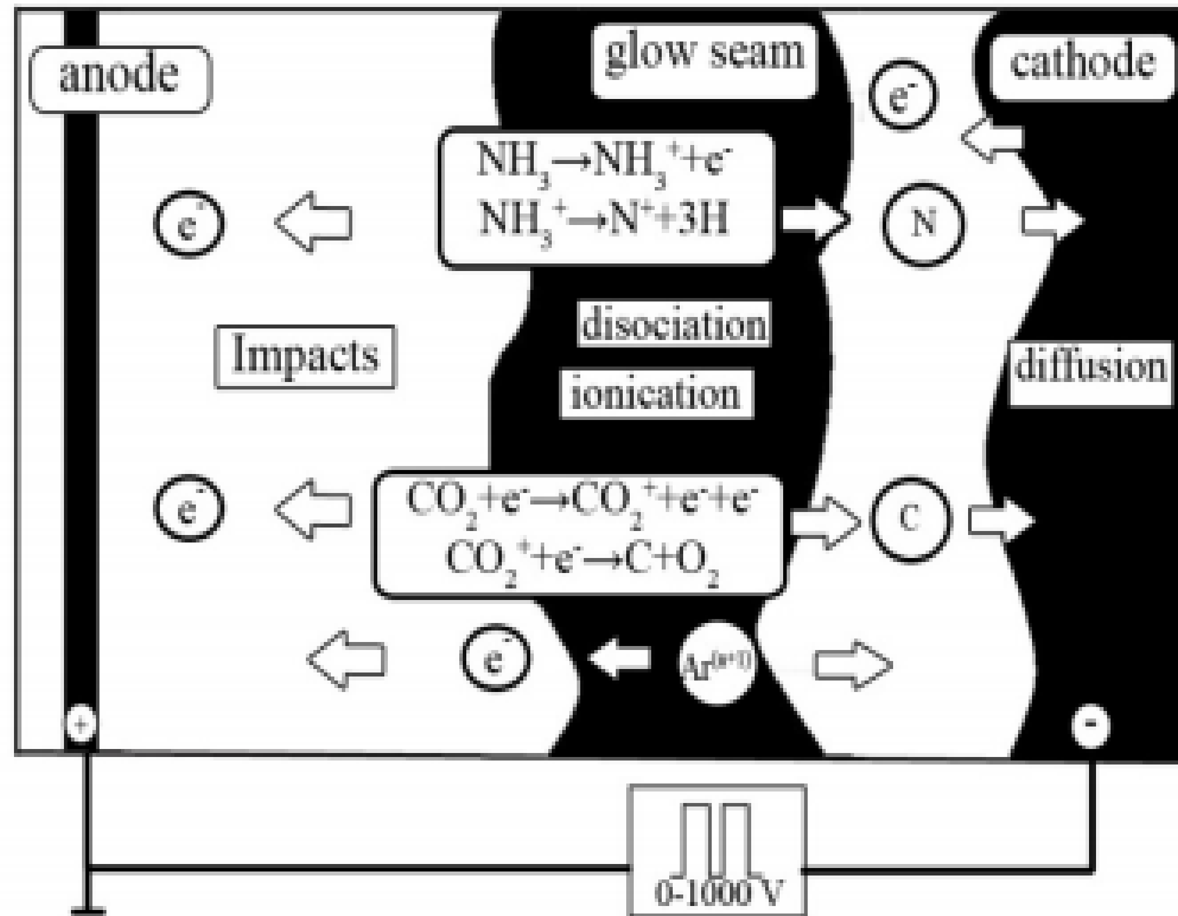


Comparison of the AlN layer formed on the aluminum substrates between low-rate and fast-rate plasma nitridings.

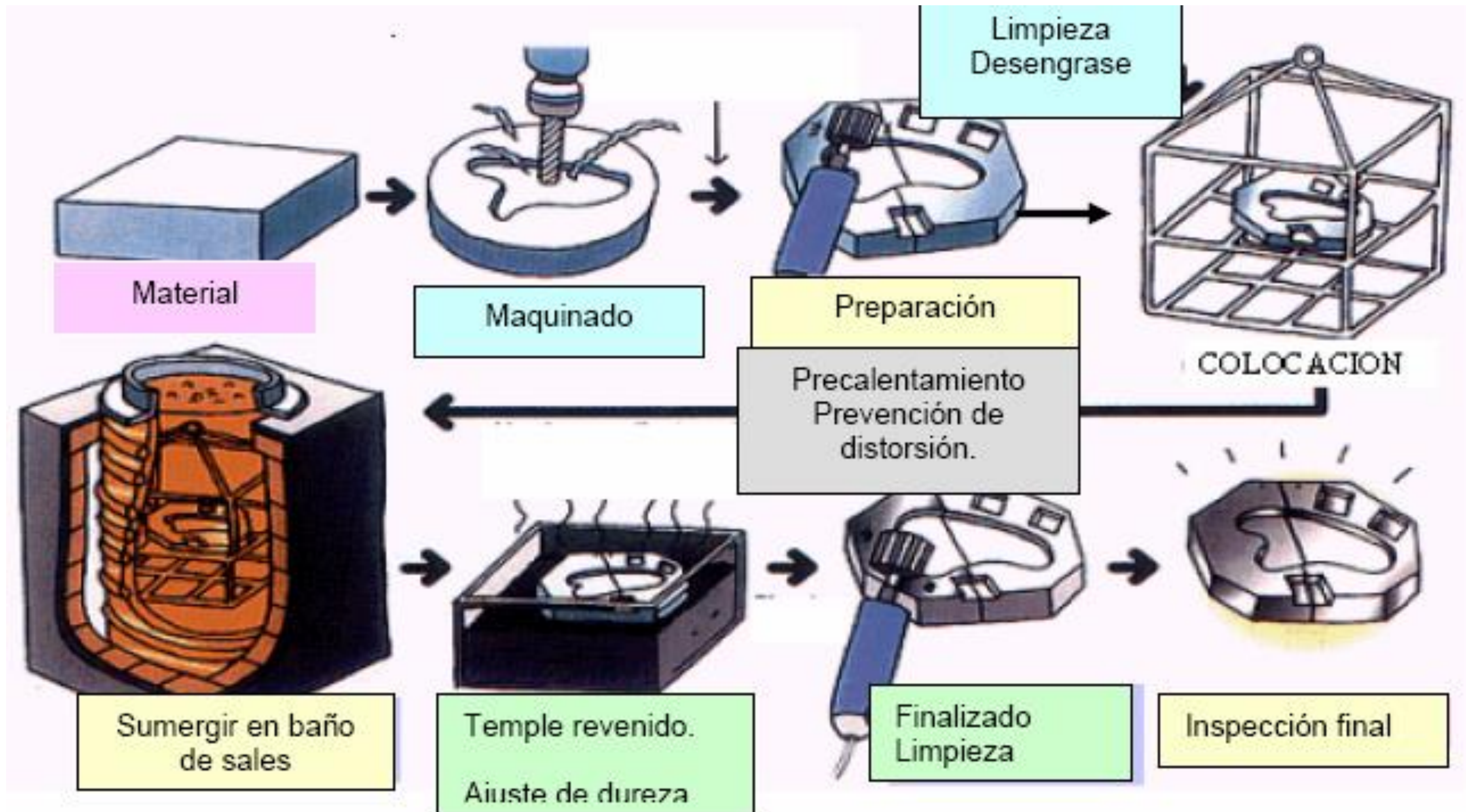
Carbonitruraciòn por plasma

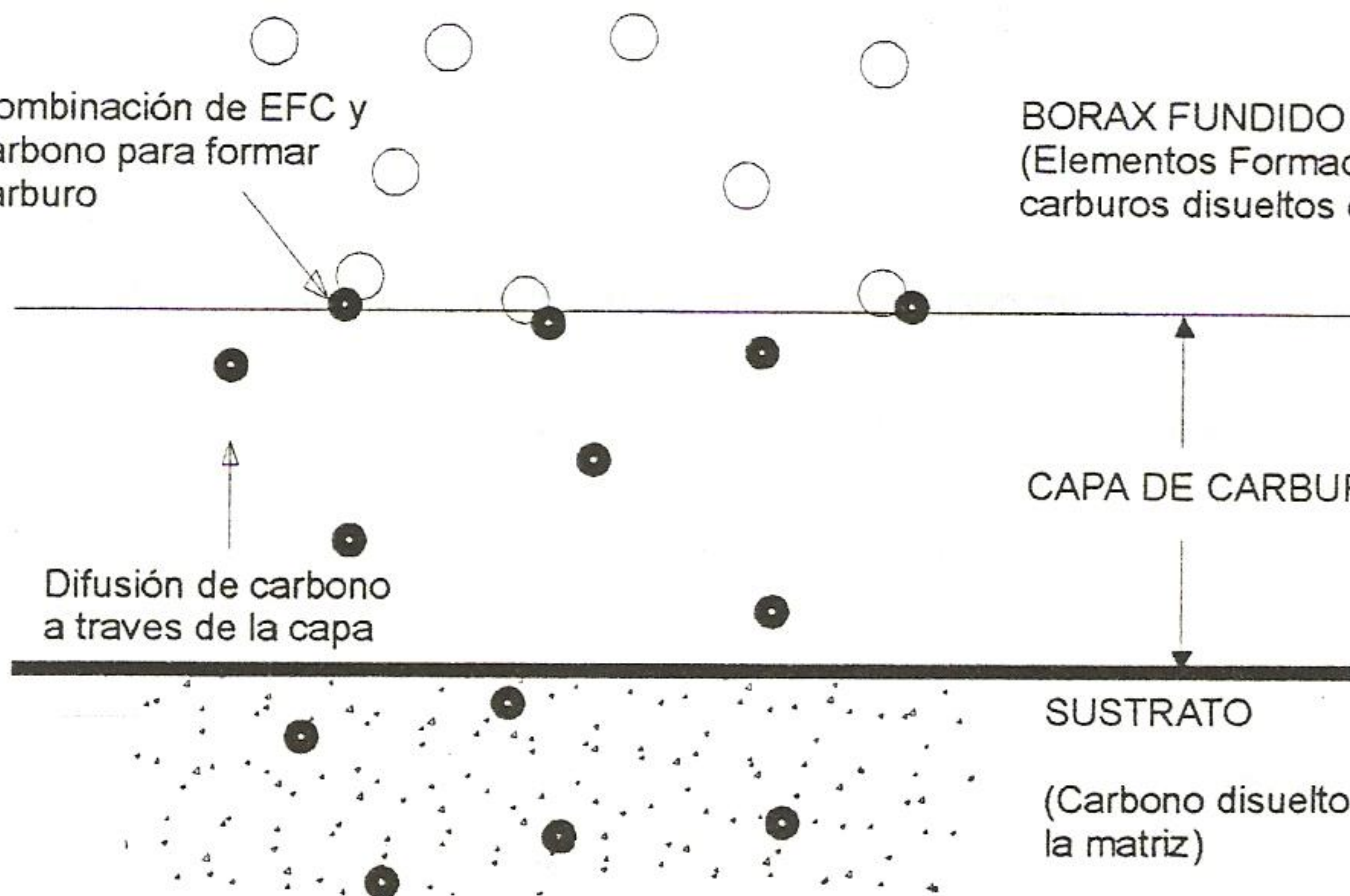
Precursores:
CO_{2}, NH_{3}, Ar

Se forma:
CO, C, O, N y H



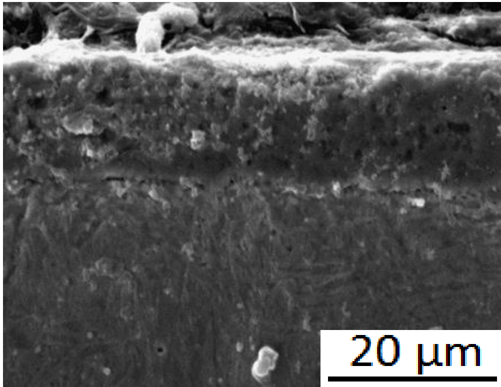
Deposiciòn – Difusiòn Termoreactiva



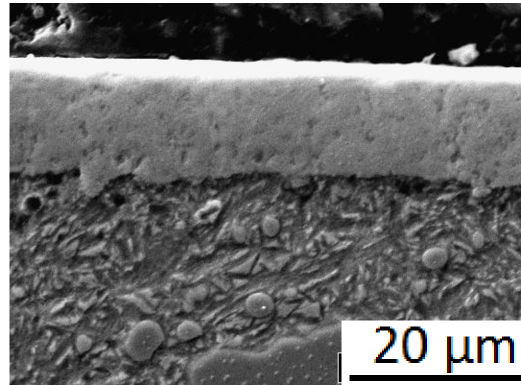


Combinación de EFC y carbono para formar carburo
BORAX FUNDIDO
(Elementos Formadores de carburos disueltos en el baño)
CAPA DE CARBURO
Difusión de carbono a traves de la capa
SUSTRATO
(Carbono disuelto en la matriz)

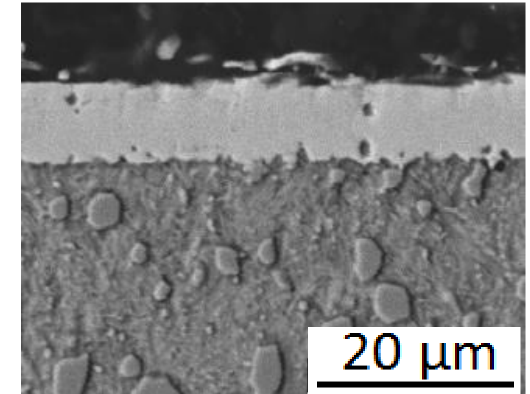
SEM



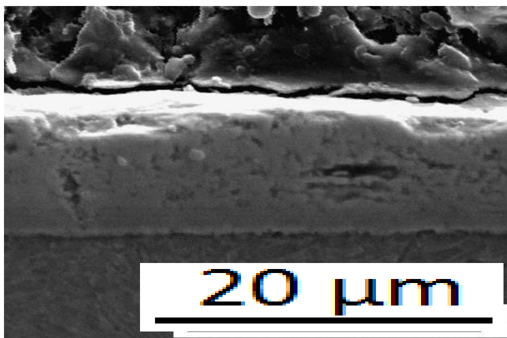
V_8C_7



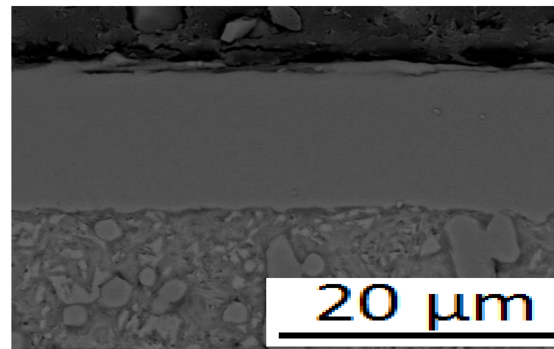
NbC



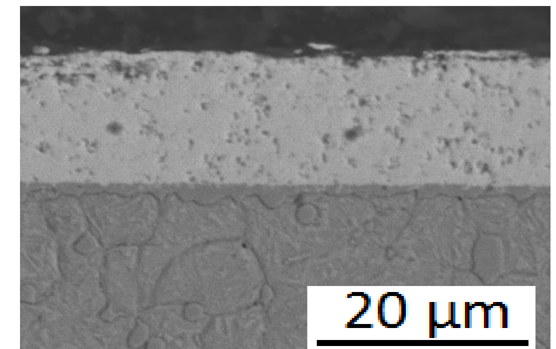
Cr_xC_y



$NbVC_2$

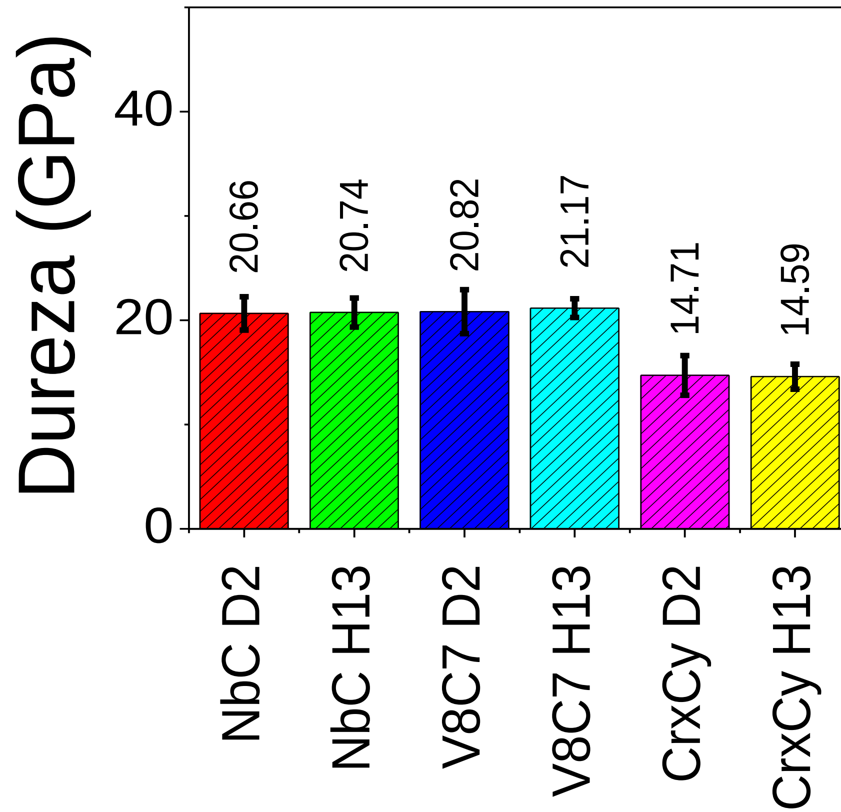


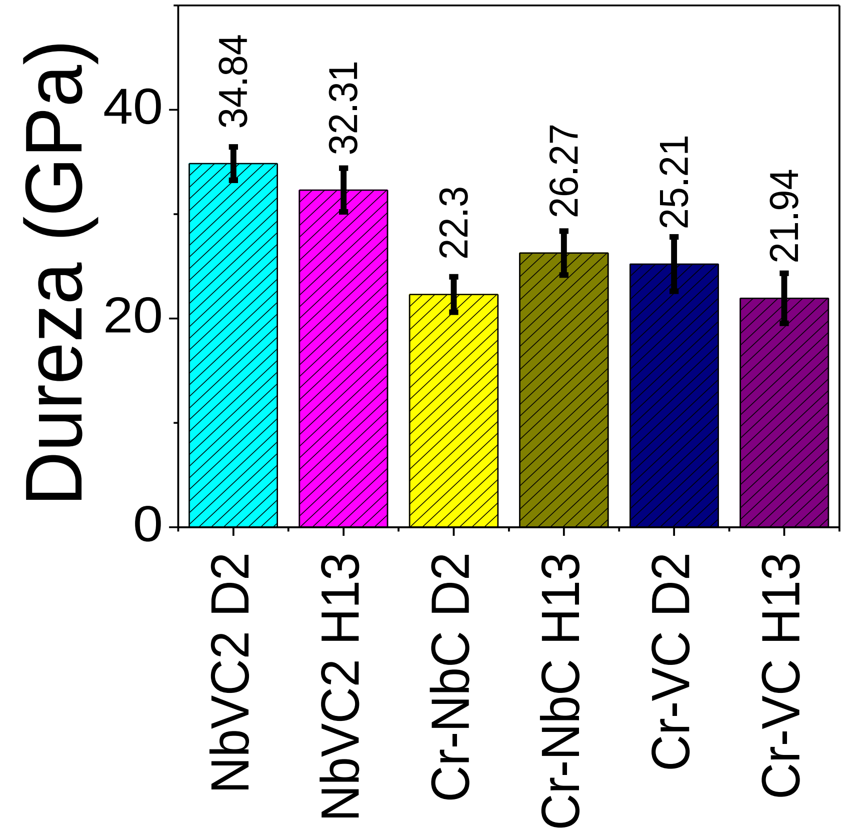
V-CrC



Nb-CrC

Prueba de Dureza





La superficie de un acero que contiene 0.1% de carbono debe endurecerse por carburización. En la carburización, el acero se coloca en una atmósfera que le proporcionará 1.2% de C en la superficie a temperatura elevada. El carbón se difunde desde la superficie hacia el interior del acero. Para conseguir propiedades óptimas, el acero debe contener 0.45% de C a una profundidad de 0.2 cm por debajo de la superficie. Diseñe el tratamiento térmico de carburización para producir estas propiedades. Suponga que la temperatura es lo suficientemente alta (por lo menos 900°C) de manera que el hierro tenga una estructura CCC.

Sabemos que $c_s = 1.2\%$ C, $c_0 = 0.1\%$ C, $c_x = 0.45\%$ C y $x = 0.2$ cm. Partiendo de la segunda ley de Fick:

Cociente de concentraciones →

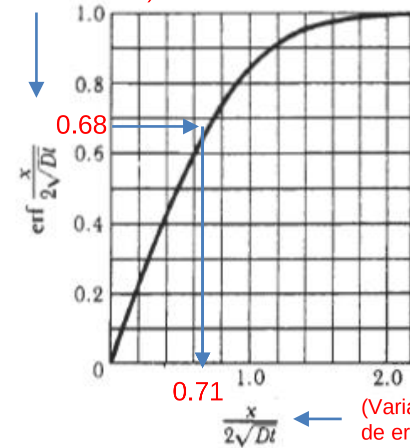
$$\frac{c_s - c_x}{c_s - c_0} = \frac{1.2 - 0.45}{1.2 - 0.1} = 0.68 = \text{erf}\left(\frac{0.2}{2\sqrt{Dt}}\right) = \text{erf}\left(\frac{0.1}{\sqrt{Dt}}\right)$$

Función de error Gaussiana
(Se deriva de la ecuación de Gauss- Se encuentra en tablas estándar de la misma forma que los senos o cosenos)

TABLA 5-3 Función error correspondiente a la segunda ley de Fick

$\frac{x}{2\sqrt{Dt}}$	erf $\frac{x}{2\sqrt{Dt}}$
0	0
0.10	0.1125
0.20	0.2227
0.30	0.3286
0.40	0.4284
0.50	0.5205
0.60	0.6039
0.70 ←	0.6778
0.80	0.7421
0.90	0.7970
1.00	0.8427
1.50	0.9661
2.00	0.9953

(Función de error)

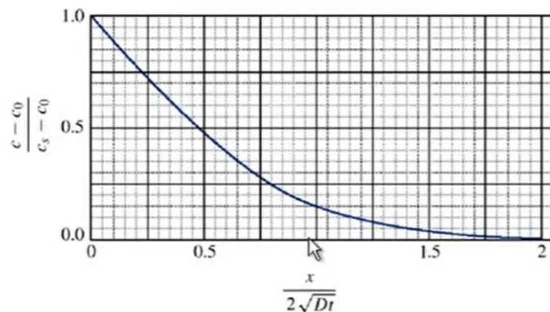


(Variable de la función de error o argumento)

$$\frac{0.1}{\sqrt{Dt}} = 0.71 \quad \text{de} \quad Dt = \left(\frac{0.1}{0.71}\right)^2 = 0.0198$$

$$D = 0.23 \exp\left(\frac{-32{,}900}{1.987T}\right) = 0.23 \exp\left(\frac{-16{,}558}{T}\right)$$

$$t = \frac{0.0198}{D} = \frac{0.0198}{0.23 \exp(-16{,}558/T)} = \frac{0.0861}{\exp(-16{,}558/T)}$$



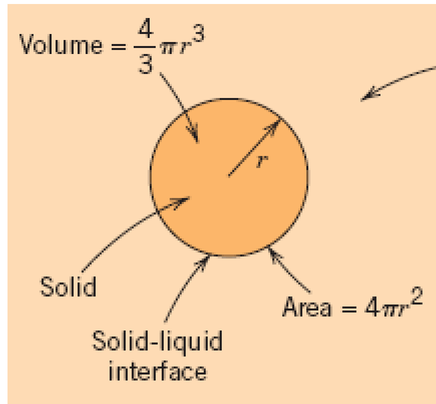
Algunas combinaciones típicas de temperatura y tiempo son:

Si $T = 900°\text{C} = 1173$ K, entonces $t = 116{,}174$ s $= 32.3$ h
Si $T = 1000°\text{C} = 1273$ K, entonces $t = 36{,}360$ s $= 10.7$ h
Si $T = 1100°\text{C} = 1373$ K, entonces $t = 14{,}880$ s $= 4.13$ h
Si $T = 1200°\text{C} = 1473$ K, entonces $t = 6{,}560$ s $= 1.82$ h

DIAGRAMAS DE FASE

SOLIDIFICACIÓN

Nucleación



$$\Delta G_T = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma$$

donde ΔG_T = cambio de energía libre total
r = radio del embrión o núcleo
ΔG_v = cambio de energía libre volumétrica
γ = energía libre superficial específica

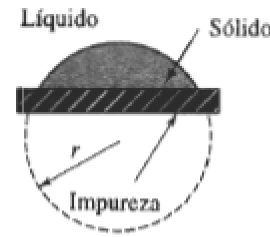
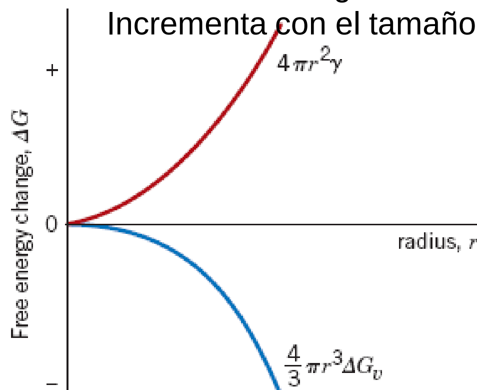
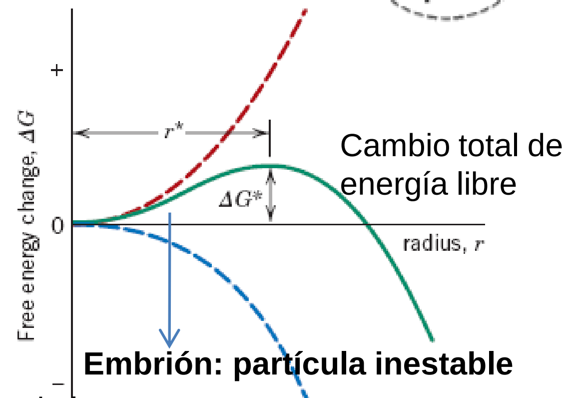


FIGURA 8-3 Una formación de un sólido sobre una impureza puede tener el radio crítico con un incremento menor en energía superficial. Así, con subenfriamientos relativamente bajos puede ocurrir la nucleación heterogénea.

Cambio de energía libre de superficie. Incrementa con el tamaño del sólido.





Cambio total de energía libre

Embrión: partícula inestable

Cambio de energía libre de volumen. Depende de la energía de l líquido y sólido. Es la fuerza motriz de la solidificación.

Figure 10.2 (*a*) Schematic curves for volume free energy and surface free energy contributions to the total free energy change attending the formation of a spherical embryo/nucleus during solidification. (*b*) Schematic plot of free energy versus embryo/nucleus radius, on which is shown the critical free energy change (ΔG^*) and the critical nucleus radius (r^*).

Radio crítico para la nucleación:

$$r^* = \frac{2\sigma T_m}{\Delta H_f \, \Delta T}$$

La partícula sólida es estable y comienza a crecer.

Temperatura de fusión

$$r^* = \left(-\frac{2\gamma T_m}{\Delta H_f}\right)\left(\frac{1}{T_m - T}\right)$$

Calor latente de fusión   sub enfriamiento

DIAGRAMAS DE FASE

SOLIDIFICACIÓN

Crecimiento: **depende de cómo el calor se elimina en el material fundido**

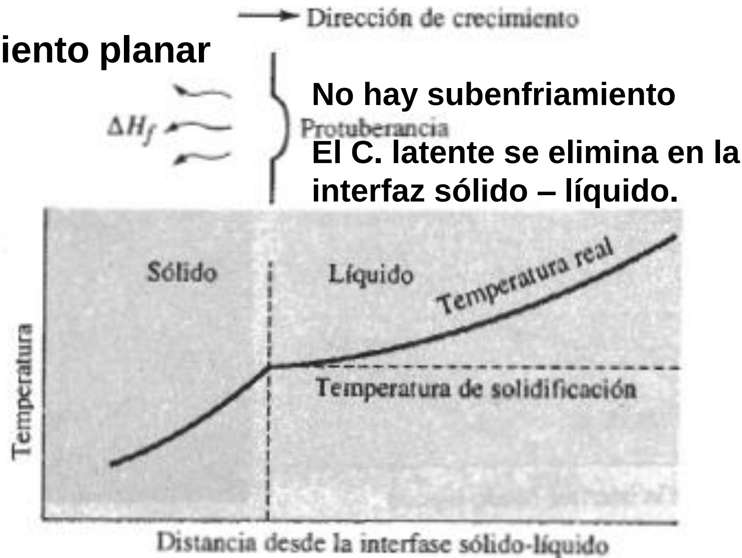
1) Calor especifico del liquido: cambiar en un grado la temperatura de un cuerpo, hasta llegar a la T de solidificación.

2) calor latente: Calor para formar el sólido, define el mecanismo de crecimiento.

Crecimiento planar

No hay subenfriamiento

El C. latente se elimina en la interfaz sólido – líquido.

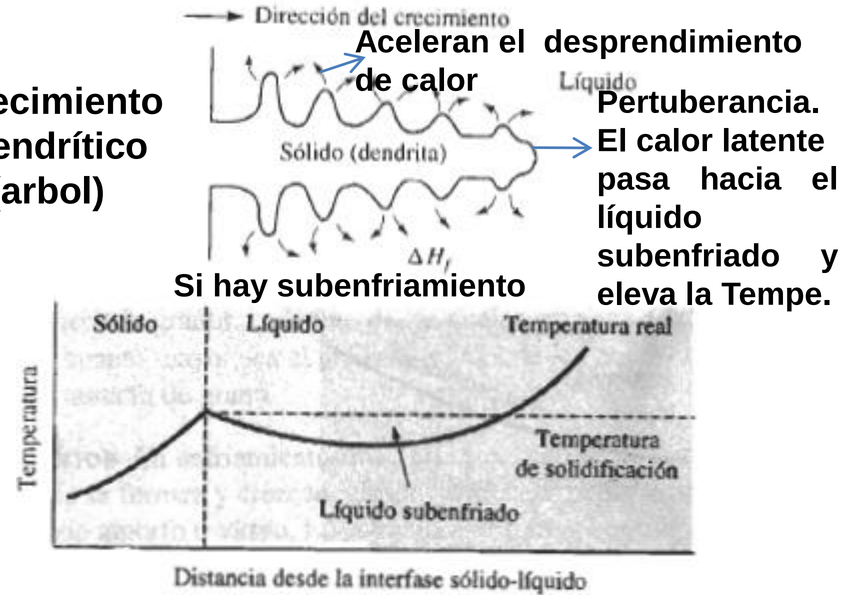


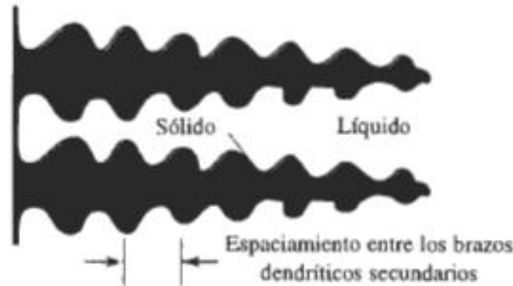
Crecimiento dendrítico (arbol)

Aceleran el desprendimiento de calor

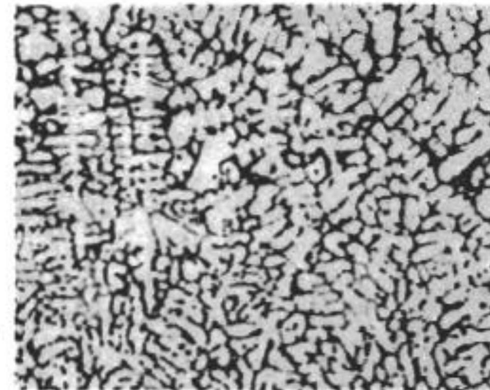
Pertuberancia. El calor latente pasa hacia el líquido subenfriado y eleva la Tempe.

Si hay subenfriamiento





(a)



(b)

FIGURA 8-6 (a) El espaciamiento entre los brazos dendríticos secundarios (EBDS). (b) Dendritas en una aleación de aluminio (× 50). (*De* Metals Handbook, *Vol. 9, 9a edición, American Society for Metals, 1985.*)

DIAGRAMAS DE FASE

1) Se puede definir como toda porción, que puede incluir a la totalidad de un sistema, que es físicamente homogénea dentro de si misma y limitada por una superficie.
2) Es una región que difiere en estructura y composición de otra región.
3) Porción homogénea de un sistema que tiene características físicas y químicas uniformes.

a) Tienen la misma estructura o arreglo atómico
b) Tienen la misma composición y propiedades
c) Tienen una interfaz, que lo divide de otras fases

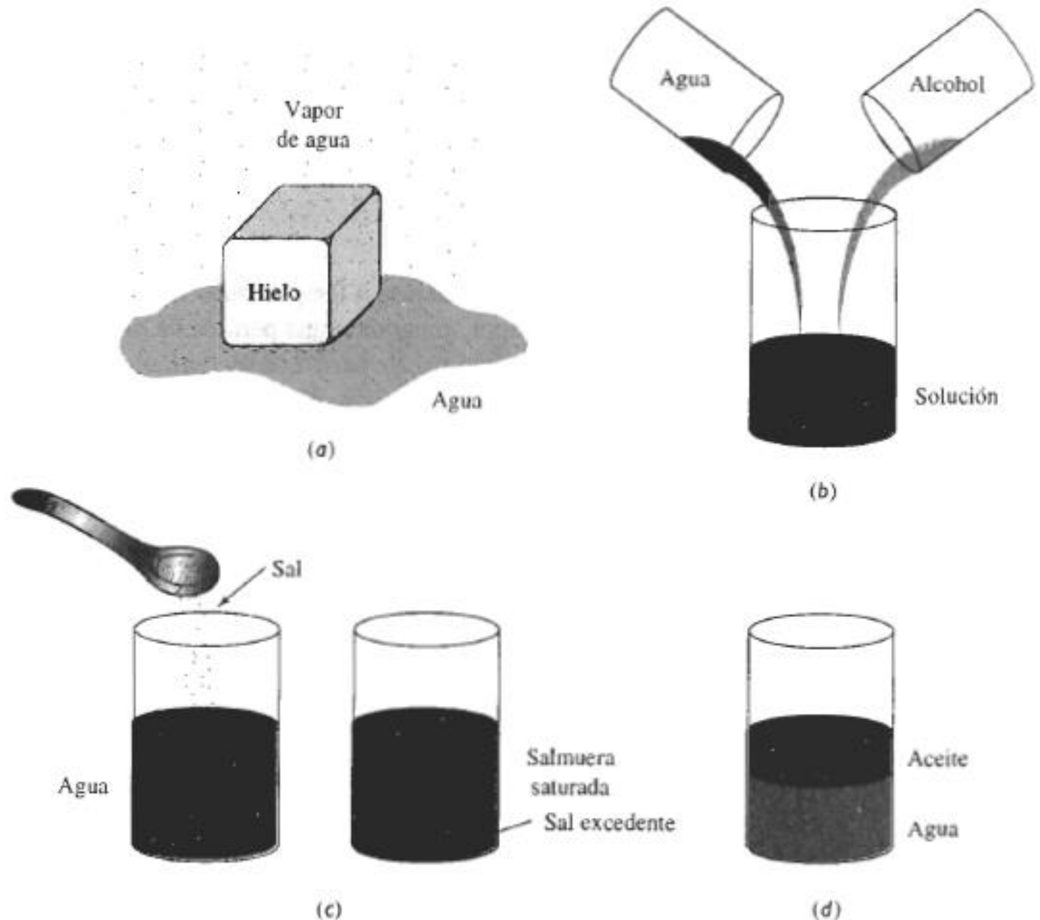


FIGURA 9-1 Ilustración de fases y solubilidad: (a) Las tres formas del agua, gas, líquido y sólido, siendo cada una de ellas una fase. (b) El agua y el alcohol tienen solubilidad ilimitada. (c) La sal y el agua tienen solubilidad limitada. (d) El aceite y el agua prácticamente no tienen solubilidad.

Regla de las Fases de Gibbs

Relaciona la cantidad de fases y de componentes.

- Es el concepto que indica el número de variables que es necesario especificar para fijar el estado termodinámico de un sistema.
- Para un diagrama de fases existen variables como temperatura, presión y composición.
- Otras variables que influyen son: Electricidad, magnetismo, gravedad, fuerzas estáticas y fuerzas de superficie.
- En un sistema en equilibrio el número de variables independientes F o grados de libertad, que se necesitan para fijar el estado termodinámico, esta dado por la regla (Temperatura, presión, composición, fases):

$$F = C - P + 2$$

C: Número de componentes, elementos o compuestos.

P: Número de fases.

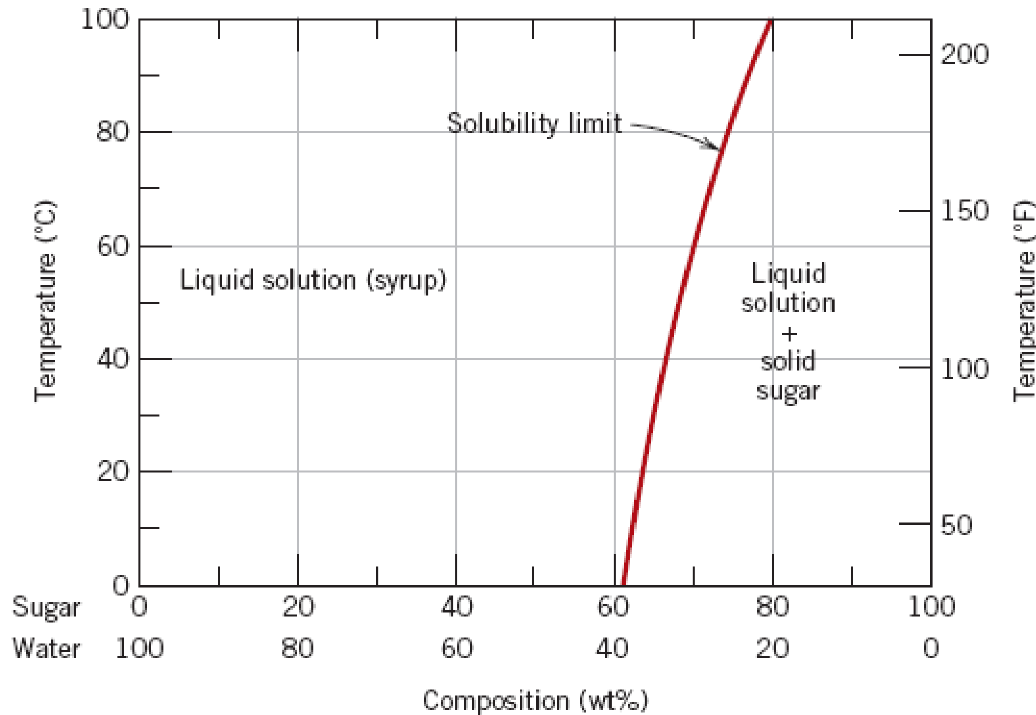
2 representa las variables de presión y temperatura.

F: Es el número de variables que puede cambiarse independientemente sin alterar el número de fases

Liquido y sólido son incompresibles a presiones ordinarias, por lo que la regla queda:

$$F = C - P + 1$$

DIAGRAMAS DE FASE



1) Punto triple:
P(3) + F = C (H_2O) + 2
F= 0 Punto invariante
No hay grados de libertad

2) Punto en la curva sólido - líquido
P(2) + F = C (H_2O) + 2
F = 1 Un grado de libertad. Se puede variar la T o la P y se mantiene las dos fases

3) Un punto en una fase:
P(1) + F = C (H_2O) + 2
F = 2 Dos grados de libertad. Se puede variar la T y la P y se mantiene la misma fase.

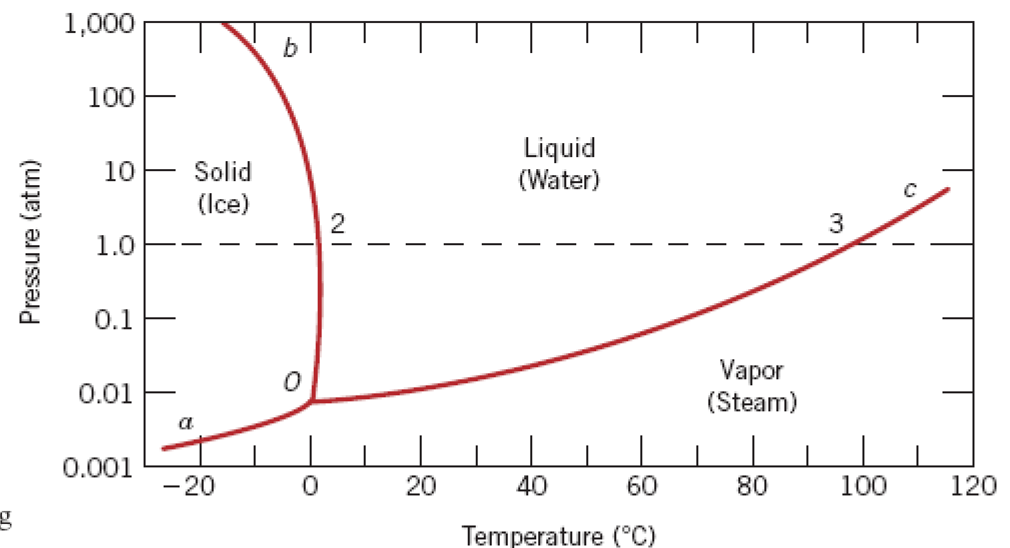


Figure 9.2 Pressure–temperature phase diagram for H_2O. Intersection of the dashed horizontal line at 1 atm pressure with the solid-liquid phase boundary (point 2) corresponds to the melting point at this pressure (T = 0°C). Similarly, point 3, the intersection with the liquid-vapor boundary, represents the boiling point (T = 100°C).

DIAGRAMAS DE FASE

REGLA DE LAS FASES DE GIBBS

Los diagramas de fase son representaciones gráficas de las fases, que estan presentes en los materiales a varias temperaturas, presiones y composiciones.

$$P + F = C + N$$

Presión constante: 1 atm : N: 1

$$P + F = C + 1$$

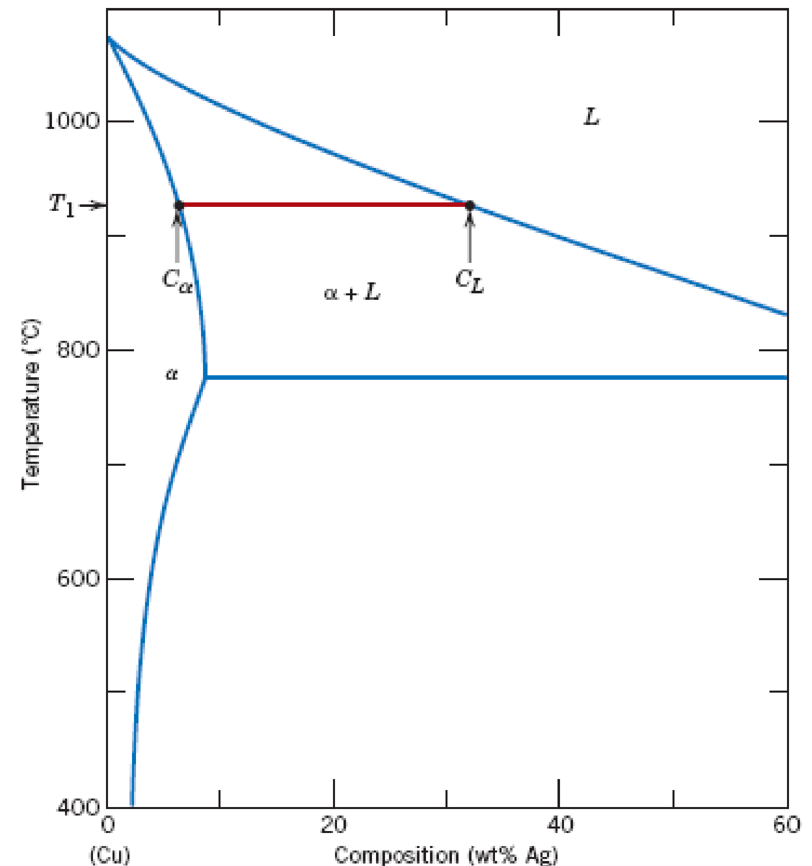
C: número de componentes: Cu + Ag = 2

$$P + F = 2 + 1 = 3$$

$$F = 3 - P$$
$$= 3 - 1 = 2$$

$$F = 3 - P$$
$$= 3 - 2 = 1$$

$$F = 3 - P$$
$$= 3 - 3 = 0$$



REACCIONES DE 3 FASES

Eutéctica	$L \rightarrow \alpha + \beta$	L; α; β; α + β
Peritéctica	$\alpha + L \rightarrow \beta$	α + L; α; L; β
Monotéctica	$L_1 \rightarrow L_2 + \alpha$	Zona de miscibilidad; L_1; L_2; α; α + L_2
Eutectoide	$\gamma \rightarrow \alpha + \beta$	γ; α; β; α + β
Peritectoide	$\alpha + \beta \rightarrow \gamma$	α + β; α; β; γ

1150°C: El punto central está a 15% B. $\delta + L$ están presentes po debajo. La reacción es

Peritéctica, $\delta + L \rightarrow \gamma$

920°C: Esta reacción ocurre a 40% B,

Monotéctica, $L_1 \rightarrow \gamma + L_2$

750°C: Esta reacción ocurre a 70% B,

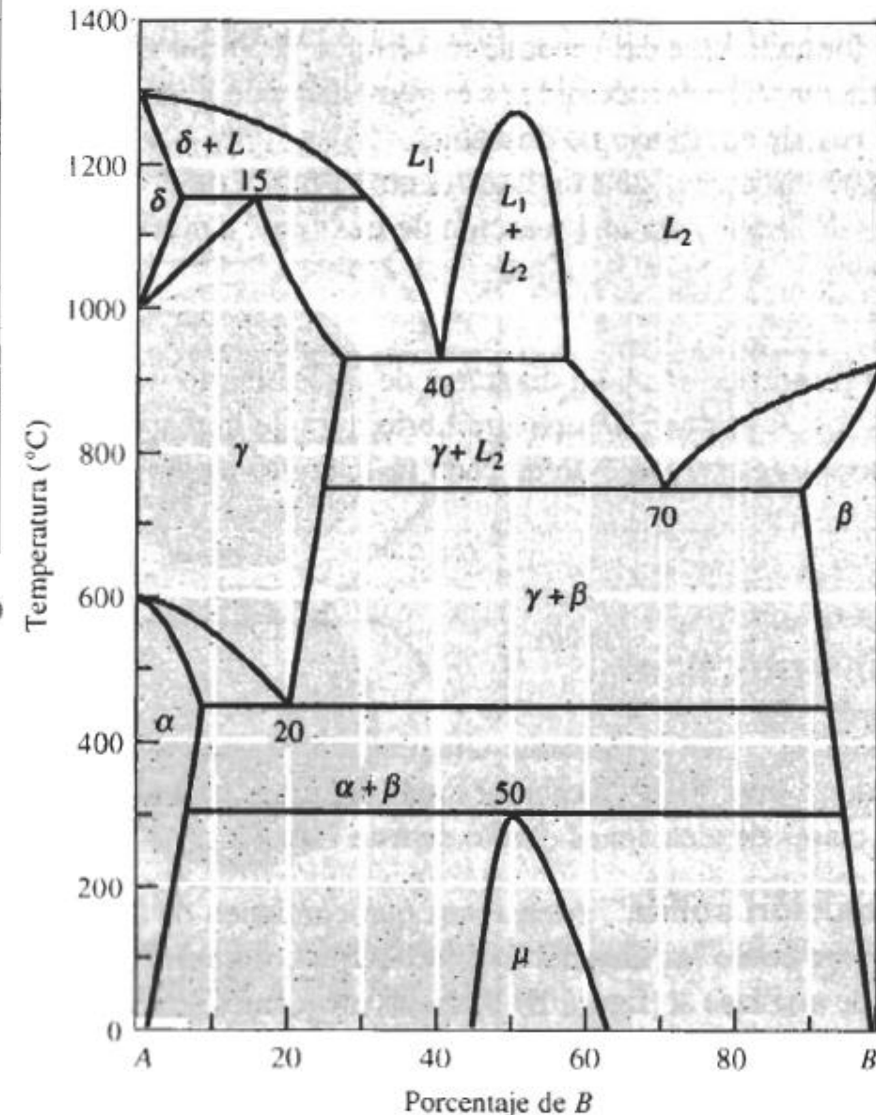
Eutéctica, $L \rightarrow \gamma + \beta$

450°C: Esta reacción ocurre a 20% B,

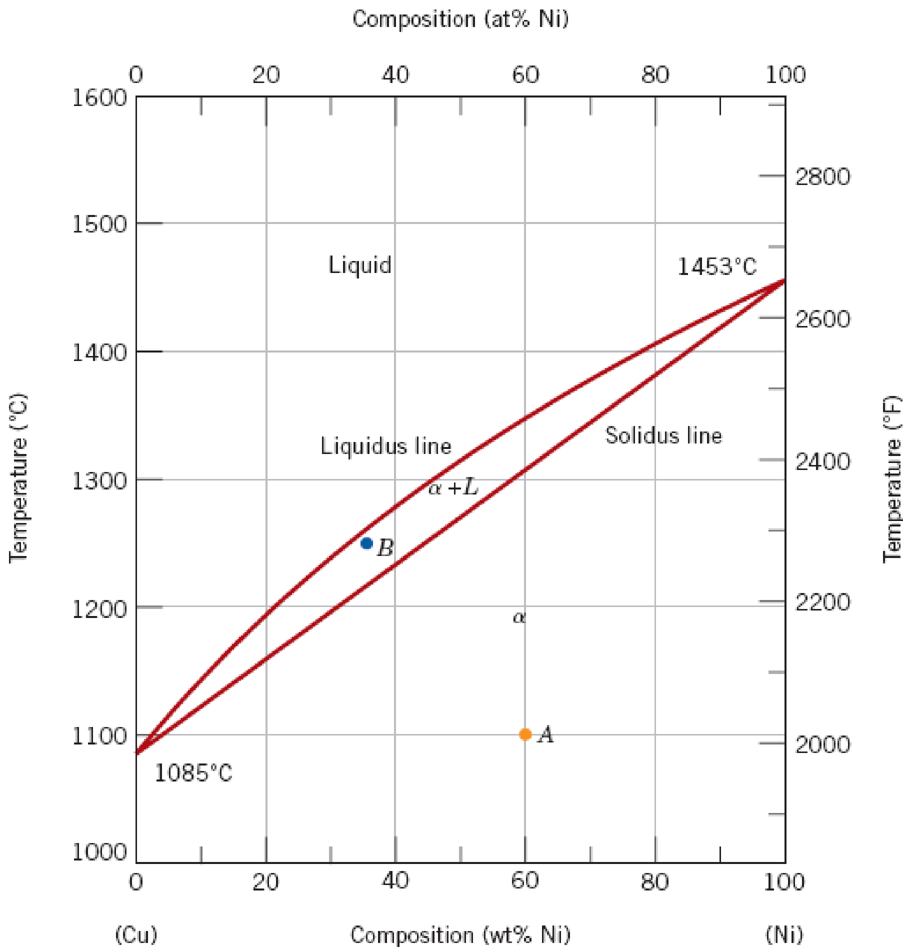
Eutectoide, $\gamma \rightarrow \alpha + \beta$

300°C: Esta reacción ocurre a 50% B,

Peritectoide, $\alpha + \beta \rightarrow \mu$



DIAGRAMAS DE FASE BINARIOS



ISOMÓRFOS

$$W_\alpha = \frac{V_\alpha \rho_\alpha}{V_\alpha \rho_\alpha + V_\beta \rho_\beta}$$

$$W_\beta = \frac{V_\beta \rho_\beta}{V_\alpha \rho_\alpha + V_\beta \rho_\beta}$$

Fracción de masa

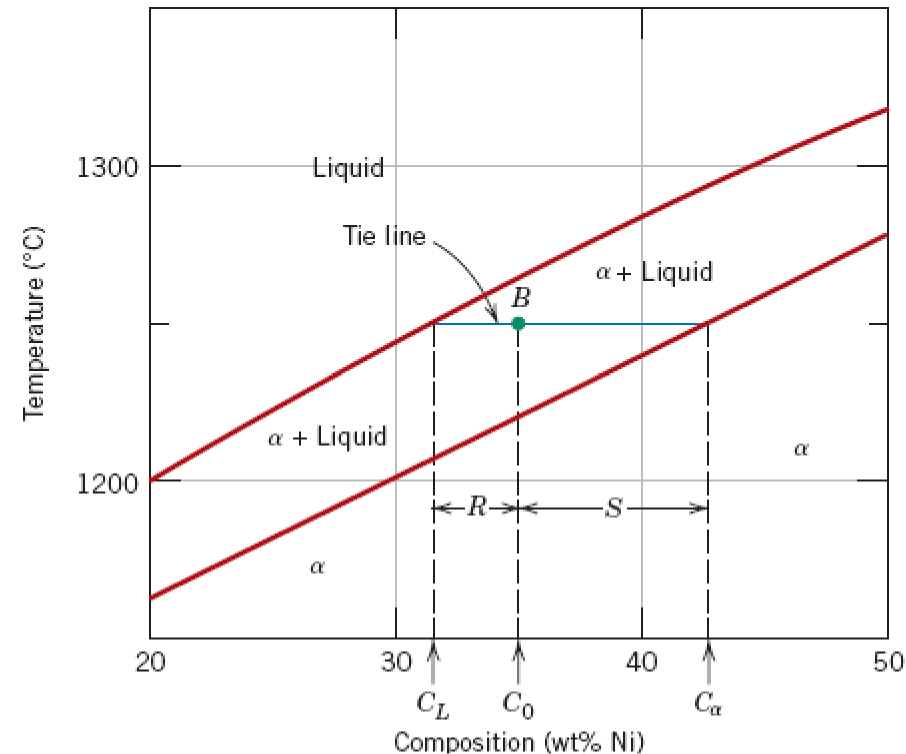
$$W_L = \frac{S}{R + S}$$

$$W_L = \frac{C_\alpha - C_0}{C_\alpha - C_L}$$

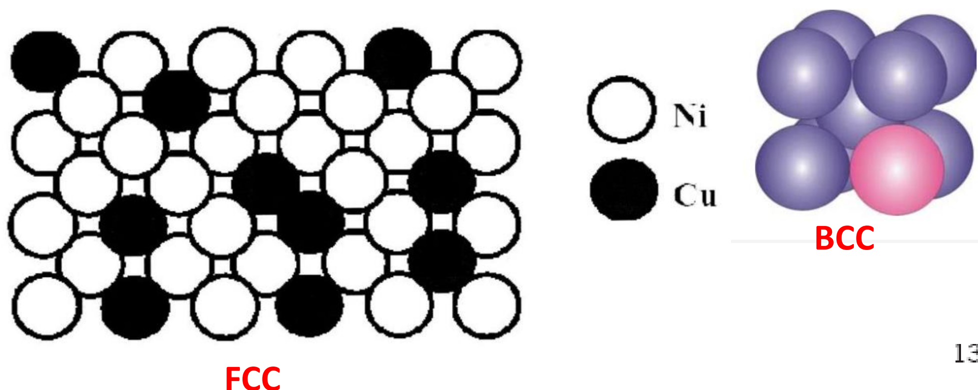
Fracción volumétrica

$$V_\alpha = \frac{\dfrac{W_\alpha}{\rho_\alpha}}{\dfrac{W_\alpha}{\rho_\alpha} + \dfrac{W_\beta}{\rho_\beta}}$$

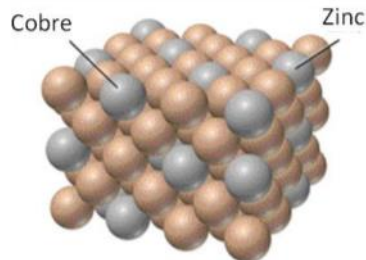
$$V_\beta = \frac{\dfrac{W_\beta}{\rho_\beta}}{\dfrac{W_\alpha}{\rho_\alpha} + \dfrac{W_\beta}{\rho_\beta}}$$



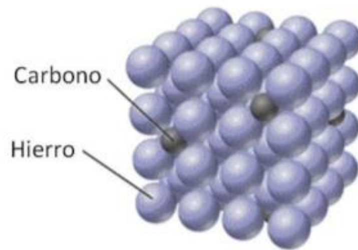
Solución solida



FCC



A Latón. Solución solida sustitucional



B Acero. Solución solida intersticia

Figura 2. Las dos formas básicas de las soluciones sólidas. A) solución solida sustitucional y B) solu sólida intersticial.

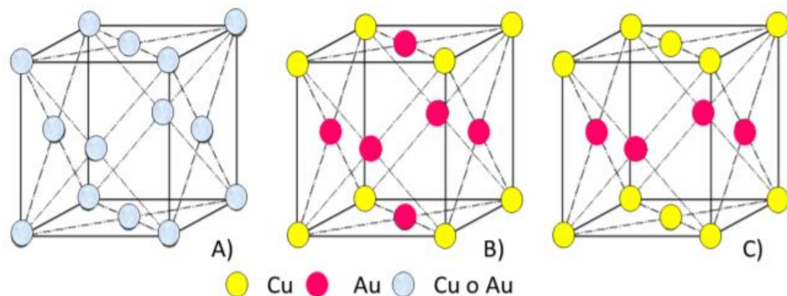


Figura 16. Estructuras sustitucionales ordenadas en el sistema Cu-Au: A) alta temperatu estructura desordenada B) super-red CuAu C) superred Cu_3Au.

ENFRIAMIENTO EN EQUILIBRIO

L

L (35 Ni)

L (35 Ni)

α (46 Ni)

α + L

a

b

c

d

e

L (32 Ni)

α (46 Ni)

α (43 Ni)

α (43 Ni)

L (24 Ni)

L (32 Ni)

L (24 Ni)

α (35 Ni)

α (35 Ni)

α

Temperature (°C): 1100, 1200, 1300

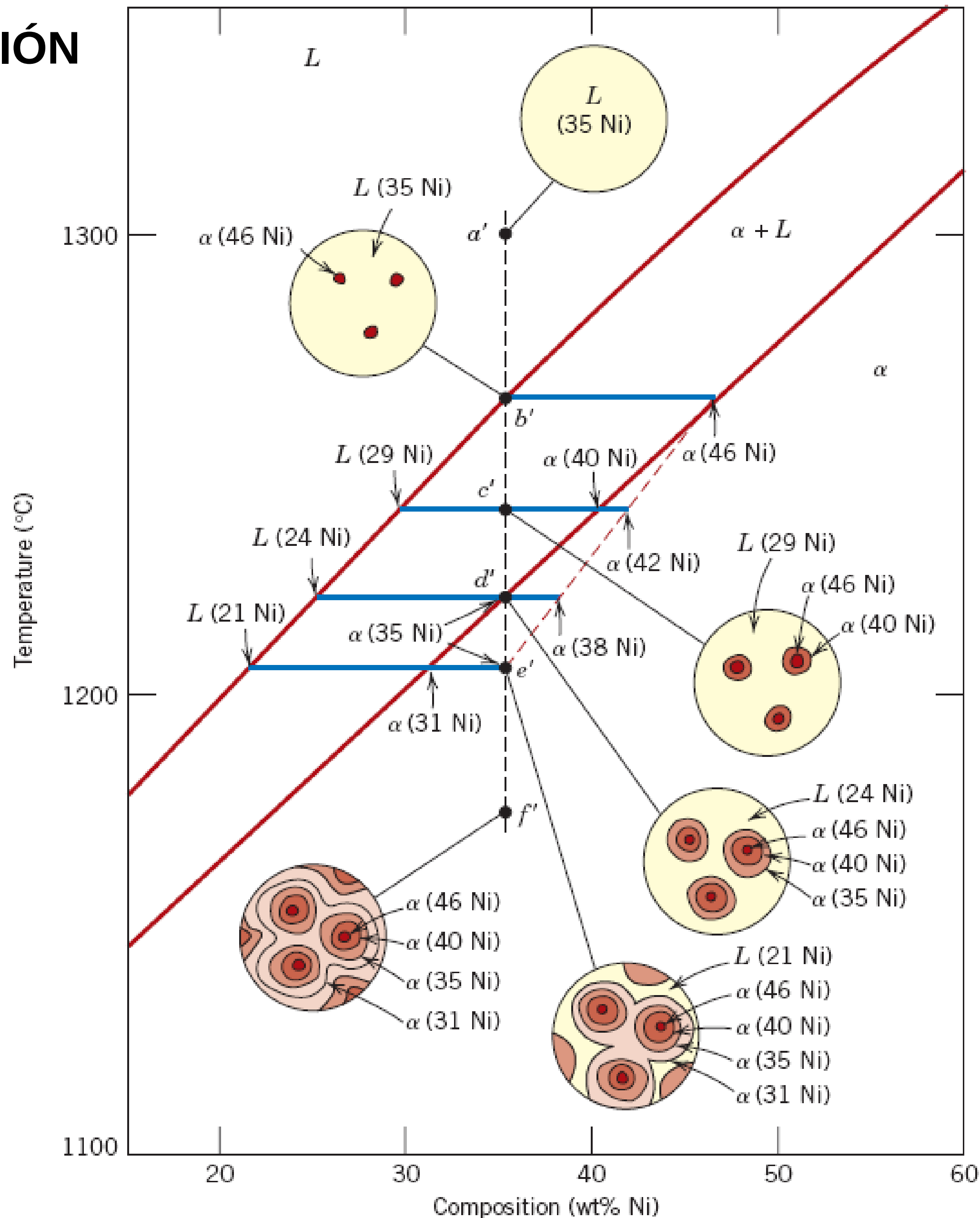
Composition (wt% Ni): 20, 30, 40, 50

https://ayudahispano-3000.blogspot.com/2015/03/apuntes-de-quimica_92.html

file:///C:/Users/User/Downloads/938-1140-1-PB.pdf https://slideplayer.es/slide/14832104/

ENFRIAMIENTO EN NO EQUILIBRIO

SEGREGACIÓN



La distribución de los dos elementos dentro del grano no es uniforme, es decir, hay un gradiente de concentración a través de los granos.

La primera parte del grano es rica del elemento con mayor temperatura de fusión.

En el límite de grano la concentración es mayor en el elemento de menor temperatura de fusión.

PROPIEDADES MECÁNICAS

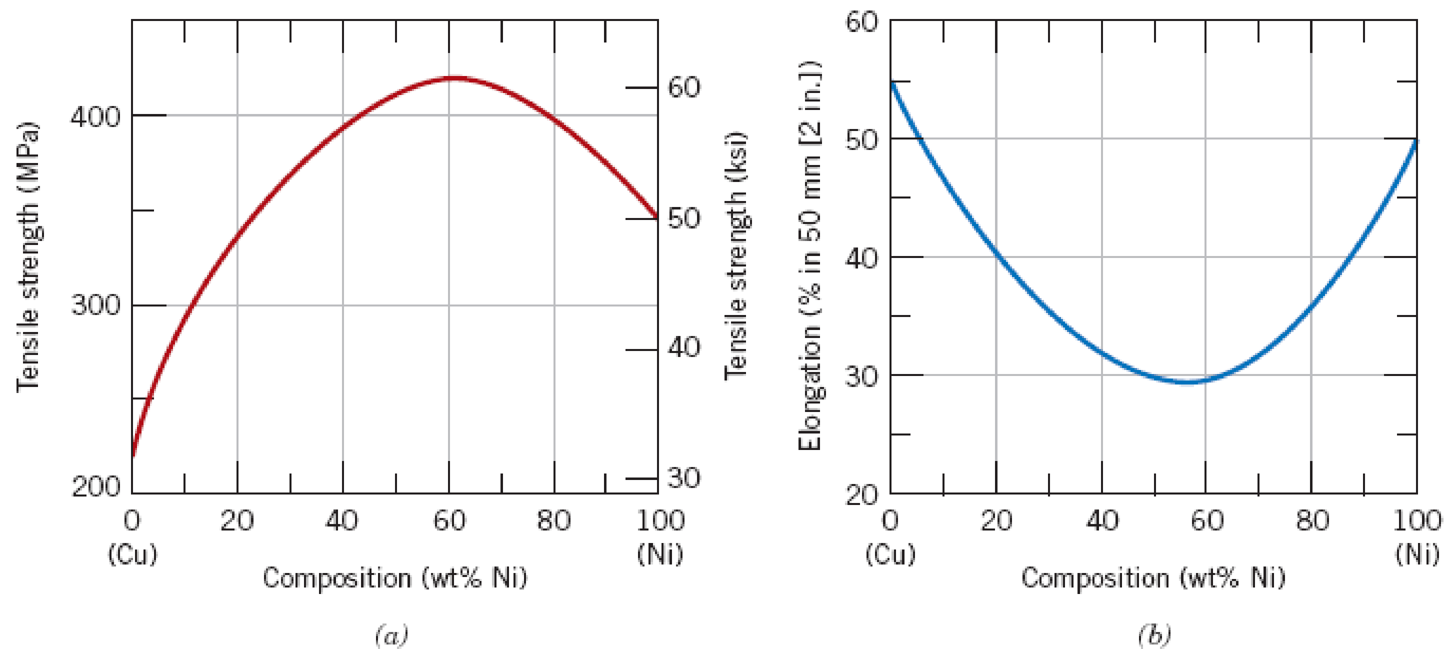
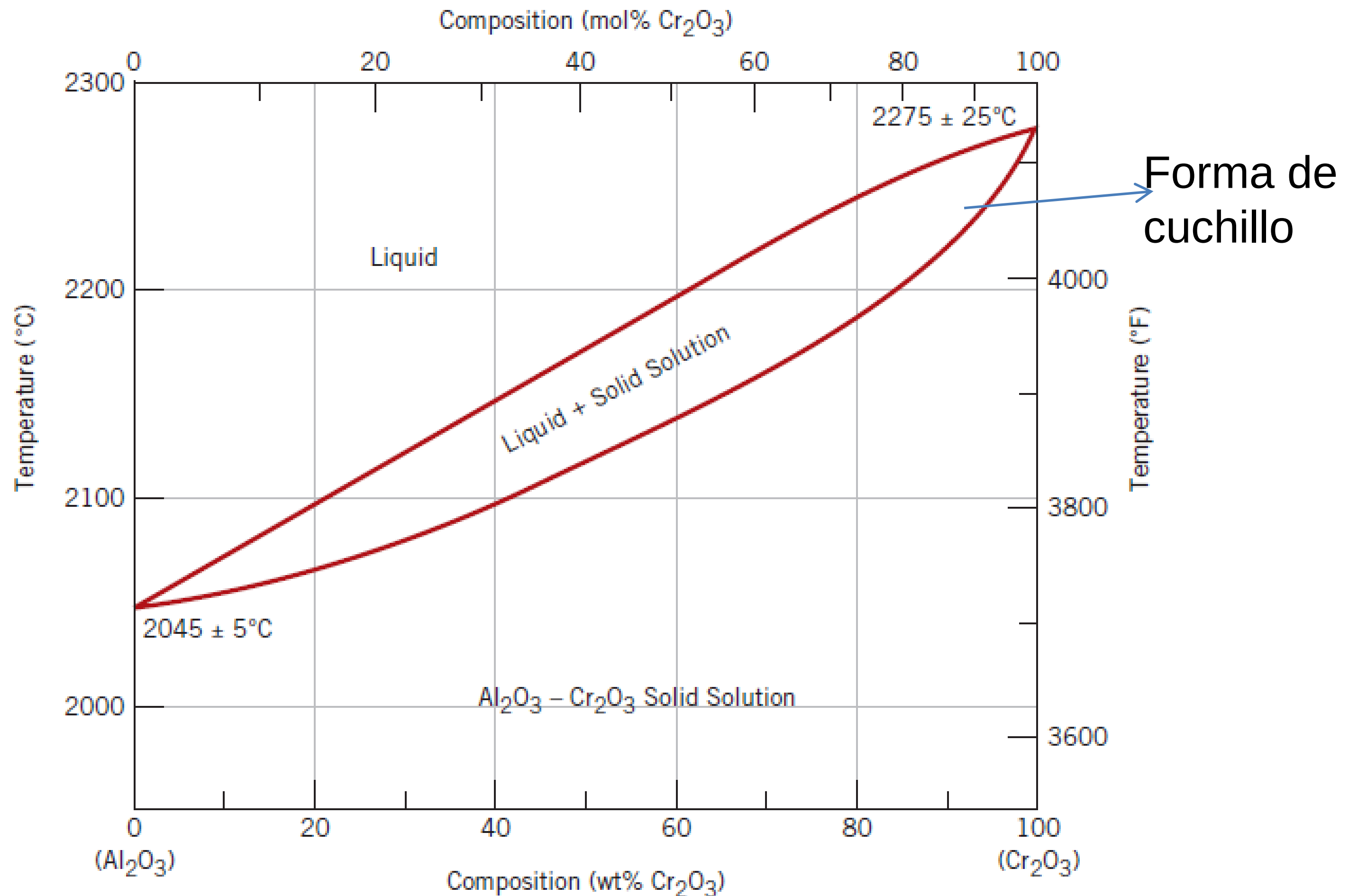


Figure 9.6 For the copper–nickel system, (*a*) tensile strength versus composition, and (*b*) ductility (%EL) versus composition at room temperature. A solid solution exists over all compositions for this system.



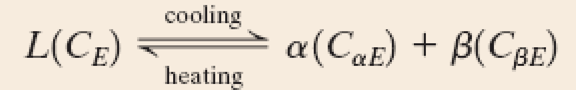
Similar al diagrama Cu – Ni.

El Al^{+3} sustituye al Cr^{+3} y viceversa, tienen la misma carga y radios similares (0.053 y 0.062 nm), tienen la misma estructura cristalina.

Los dos óxidos tienen la misma estructura cristalina

SISTEMAS EUTECTICOS

Se funde fácilmente



$$L(C_E) \underset{\text{heating}}{\overset{\text{cooling}}{\rightleftharpoons}} \alpha(C_{\alpha E}) + \beta(C_{\beta E})$$

Hay tres regiones

Composition (at% Ag)

0 20 40 60 80 100

Temperature (°C): 1200, 1000, 800, 600, 400, 200

Temperature (°F): 2200, 2000, 1800, 1600, 1400, 1200, 1000, 800, 600, 400

A

Liquidus

Liquid

Punto invariante

Solidus

F

α

$\alpha + L$

779°C (T_E)

E

$\beta + L$

B

G

8.0 ($C_{\alpha E}$)

71.9 (C_E)

91.2 ($C_{\beta E}$)

β

Solvus

$\alpha + \beta$

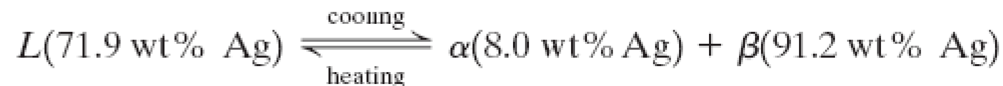
C

H

0 20 40 60 80 100

(Cu) Composition (wt% Ag) (Ag)

Figure 9.7 The copper–silver phase diagram. [Adapted from *Binary Alloy Phase Diagrams,* 2nd edition, Vol. 1, T. B. Massalski (Editor-in-Chief), 1990. Reprinted by permission of ASM International, Materials Park, OH.]



$$L(71.9 \text{ wt\% Ag}) \underset{\text{heating}}{\overset{\text{cooling}}{\rightleftharpoons}} \alpha(8.0 \text{ wt\% Ag}) + \beta(91.2 \text{ wt\% Ag})$$

400
300
200
100
Temperature (°C)
w
a
b
c
w′
L
(C_1 wt% Sn)
α
L
L
Liquidus
α
α
α
α
(C_1 wt% Sn)
Solidus
α + L
α
α + β
0
10
20
30
C_1
Composition (wt% Sn)

300
200
100
Temperature (°C)
x
d
e
f
g
x′
L
(C_2 wt% Sn)
L
L
α
α
α
α
α
C_2 wt% Sn
α + L
α
Solvus
line
β
α
α + β
0
10
20
30
40
50
C_2
Composition (wt% Sn)



$$L(61.9 \text{ wt\% Sn}) \underset{\text{heating}}{\overset{\text{cooling}}{\rightleftharpoons}} \alpha(18.3 \text{ wt\% Sn}) + \beta(97.8 \text{ wt\% Sn})$$

y

L (61.9 wt% Sn)

L

h

$\alpha + L$

α

183°C

$\beta + L$

β

18.3

i

97.8

$\alpha + \beta$

α (18.3 wt% Sn)

β (97.8 wt% Sn)

Capas o laminas alternas de alfa y beta

y'

Temperature (°C): 0, 100, 200, 300

Temperature (°F): 100, 200, 300, 400, 500, 600

0 (Pb), 20, 40, 60, 80, 100 (Sn)

C_3 (61.9)

Composition (wt%Sn)



Figure 9.14 Photomicrograph showing the microstructure of a lead–tin alloy of eutectic composition. This microstructure consists of alternating layers of a lead-rich α-phase solid solution (dark layers), and a tin-rich β-phase solid solution (light layers). 375×. (Reproduced with permission from *Metals Handbook*, 9th edition, Vol. 9, *Metallography and Microstructures*, American Society for Metals, Materials Park, OH, 1985.)

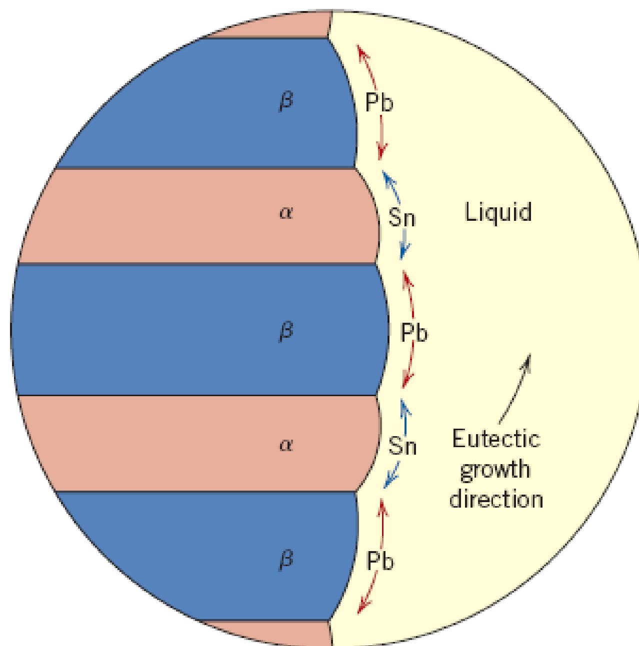


Figure 9.15 Schematic representation of the formation of the eutectic structure for the lead–tin system. Directions of diffusion of tin and lead atoms are indicated by blue and red arrows, respectively.

Los átomos de plomo se difunden hacia las capas de la fase alfa, ya que esta rica en plomo

Los átomos de estaño difunden hacia las capas de beta, ricas en estaño.

Microestructura cruzando la isoterma eutéctica: **Dos microconstituyentes**

L
(C_4 wt% Sn)

z

j

α

L

α + L

L

α(18.3 wt% Sn)

k

β + L

α

l

β

m

alfa del eutéctico

Eutectic structure

L (61.9 wt% Sn)

Primary α (18.3 wt% Sn)

α + β

β (97.8 wt% Sn)

Eutectic α (18.3 wt% Sn)

fase alfa primaria

z′

Temperature (°C): 0, 100, 200, 300

Temperature (°F): 100, 200, 300, 400, 500, 600

0 (Pb), 20, C_4 (40), 60, 80, 100 (Sn)

Composition (wt% Sn)

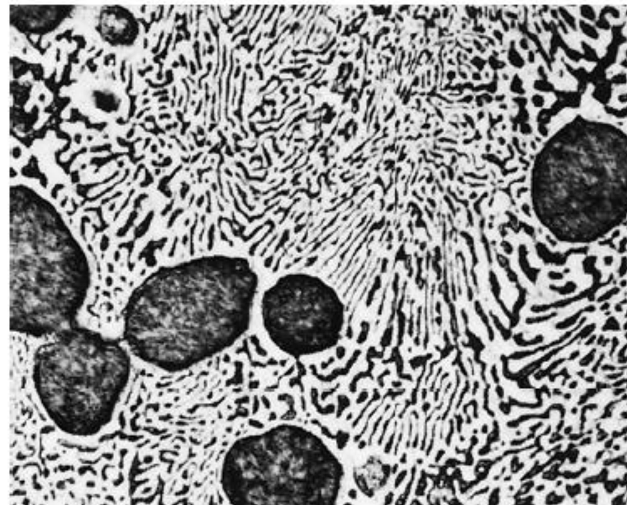


Figure 9.17 Photomicrograph showing the microstructure of a lead–tin alloy of composition 50 wt% Sn–50 wt% Pb. This microstructure is composed of a primary lead-rich α phase (large dark regions) within a lamellar eutectic structure consisting of a tin-rich β phase (light layers) and a lead-rich α phase (dark layers). 400×. (Reproduced with permission from *Metals Handbook*, 9th edition, Vol. 9, *Metallography and Microstructures*, American Society for Metals, Materials Park, OH, 1985.)

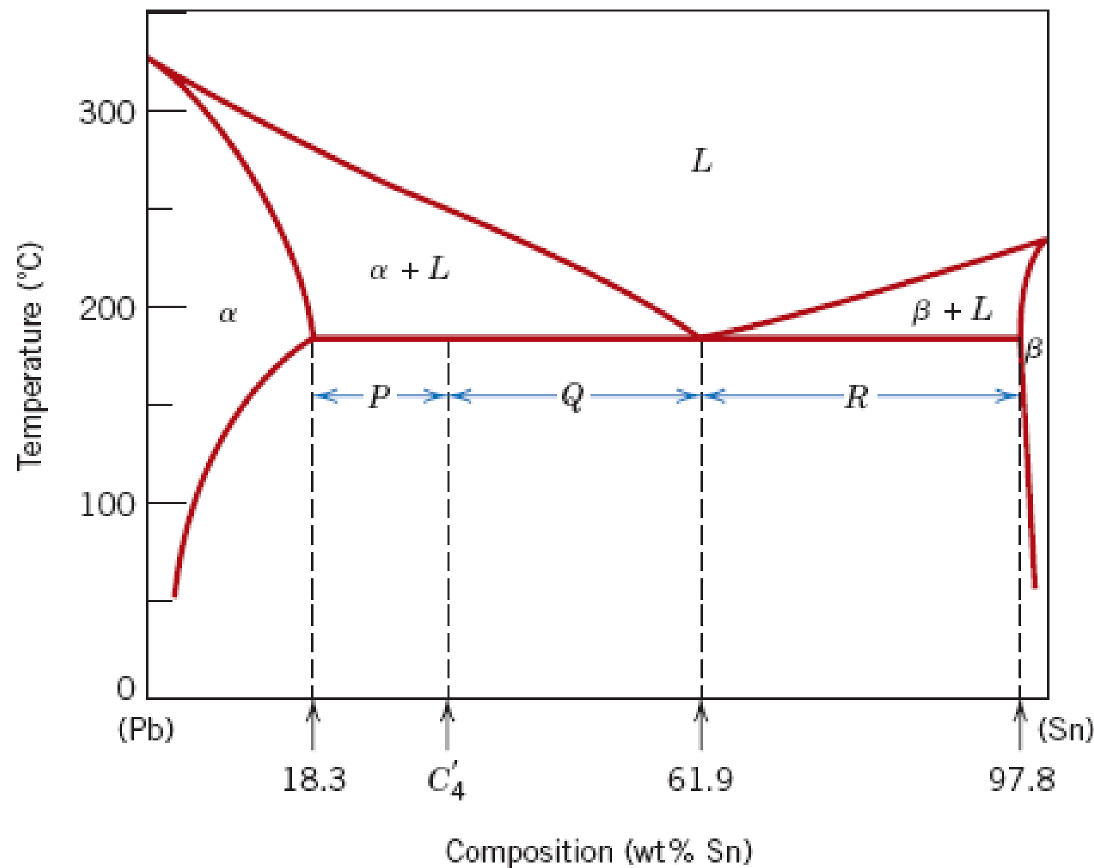


Figure 9.18 The lead–tin phase diagram used in computations for relative amounts of primary α and eutectic microconstituents for an alloy of composition C_4'.

REGLA DE LAS PALANCAS

$$W_e = W_L = \frac{P}{P + Q}$$

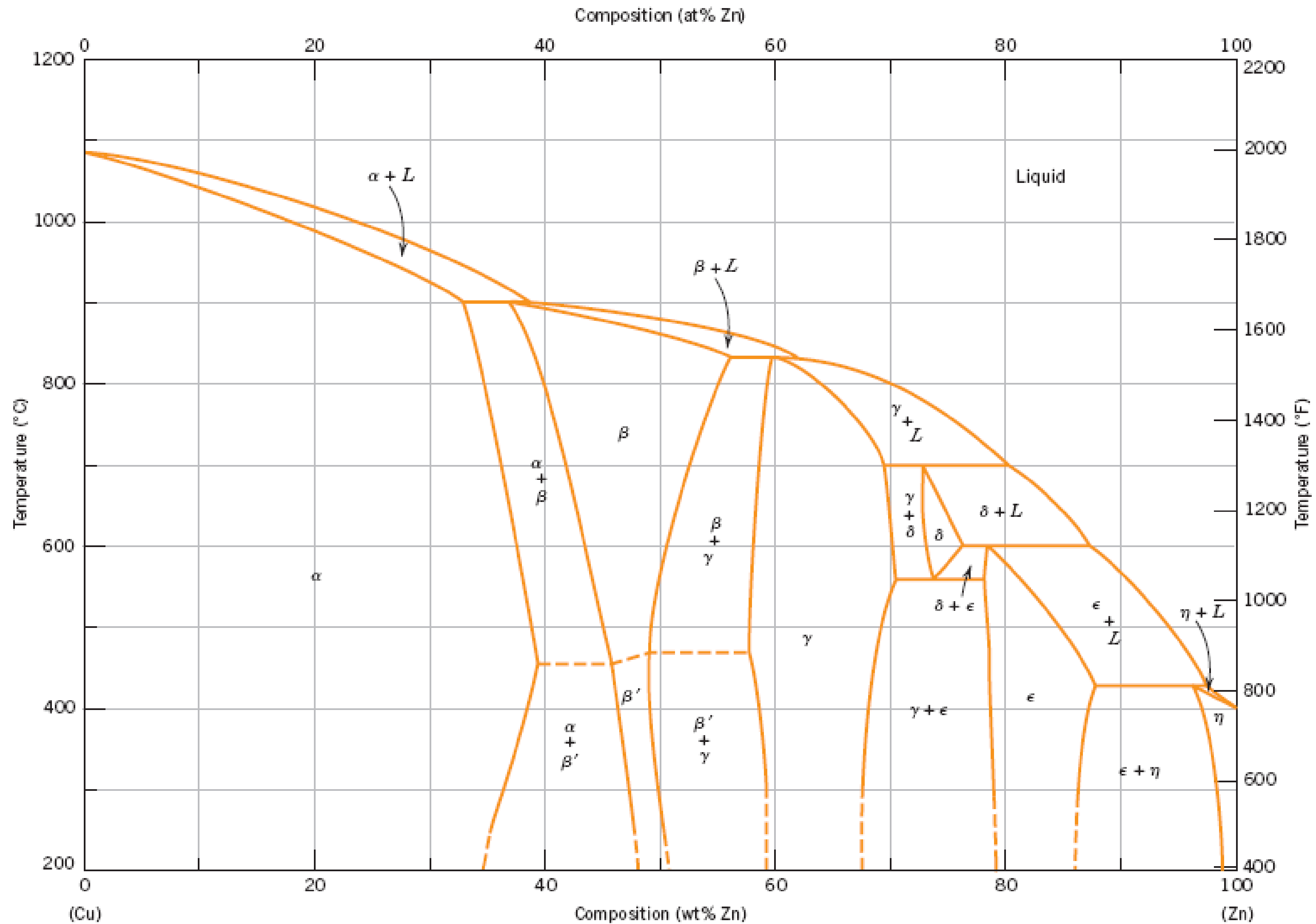
$$W_{\alpha'} = \frac{Q}{P + Q}$$

$$W_\alpha = \frac{Q + R}{P + Q + R}$$

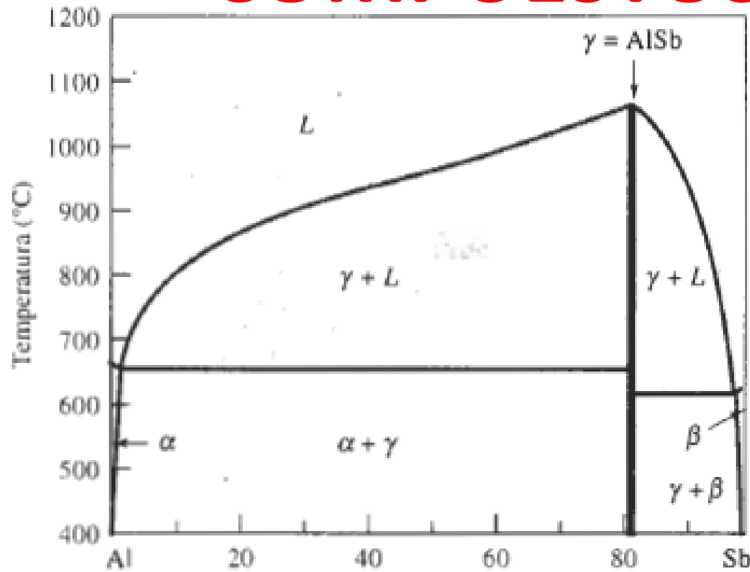
$$W_\beta = \frac{P}{P + Q + R}$$

DIAGRAMAS CON FASES INTERMEDIAS

Fases intermedias



COMPUESTOS INTERMETALICOS



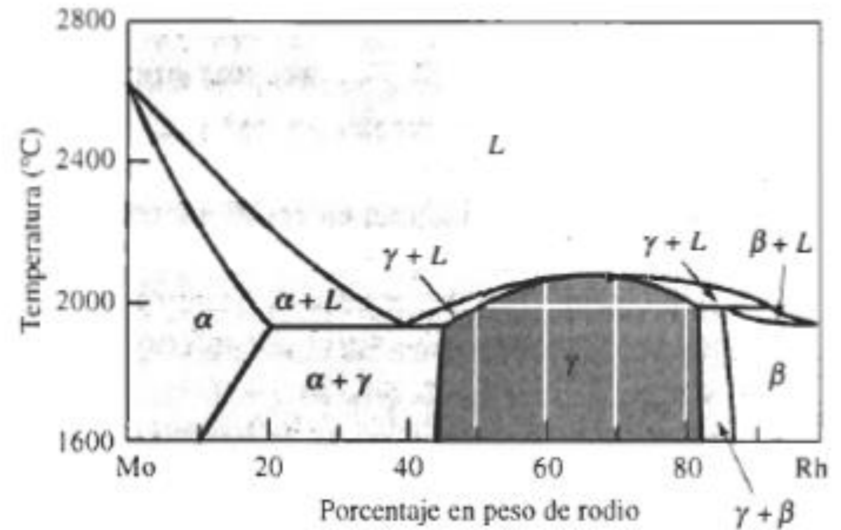
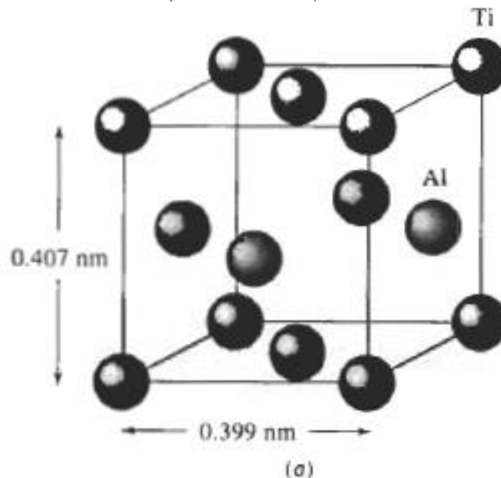


FIGURA 10-2 (a) El diagrama de fases aluminio-antimonio incluye un compuesto intermetálico estequiométrico γ. (b) El diagrama de fases molibdeno-rodio incluye un compuesto intermetálico no estequiométrico γ.

Están formados por dos o mas elementos que producen una nueva fase con su composición



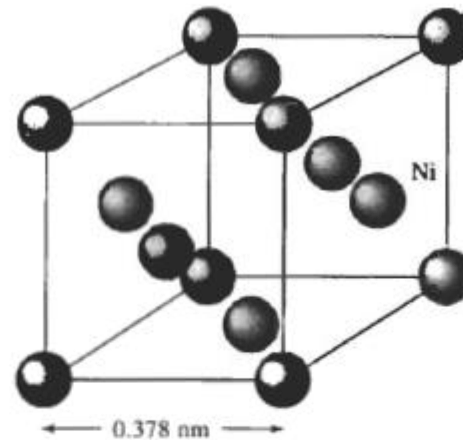
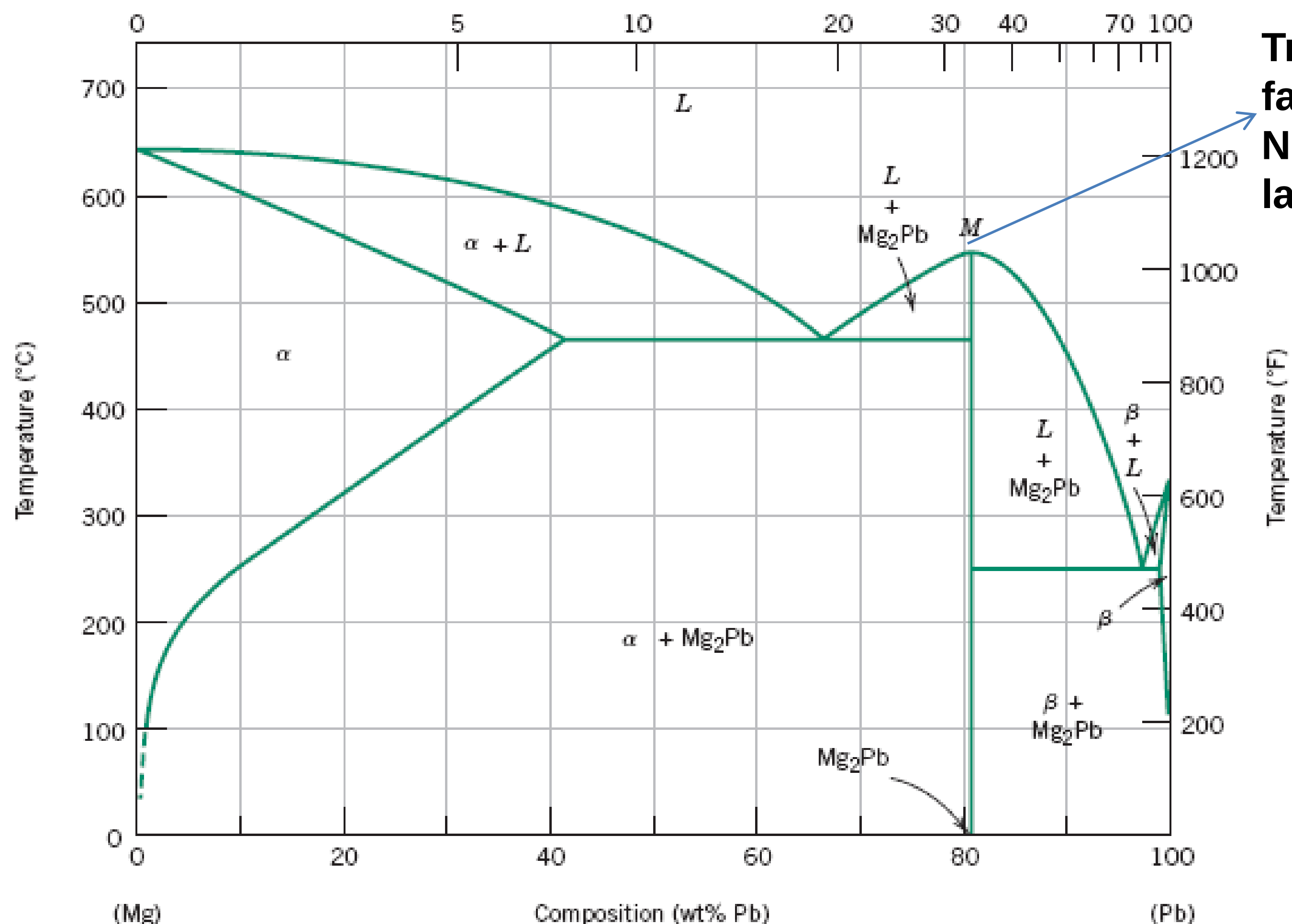
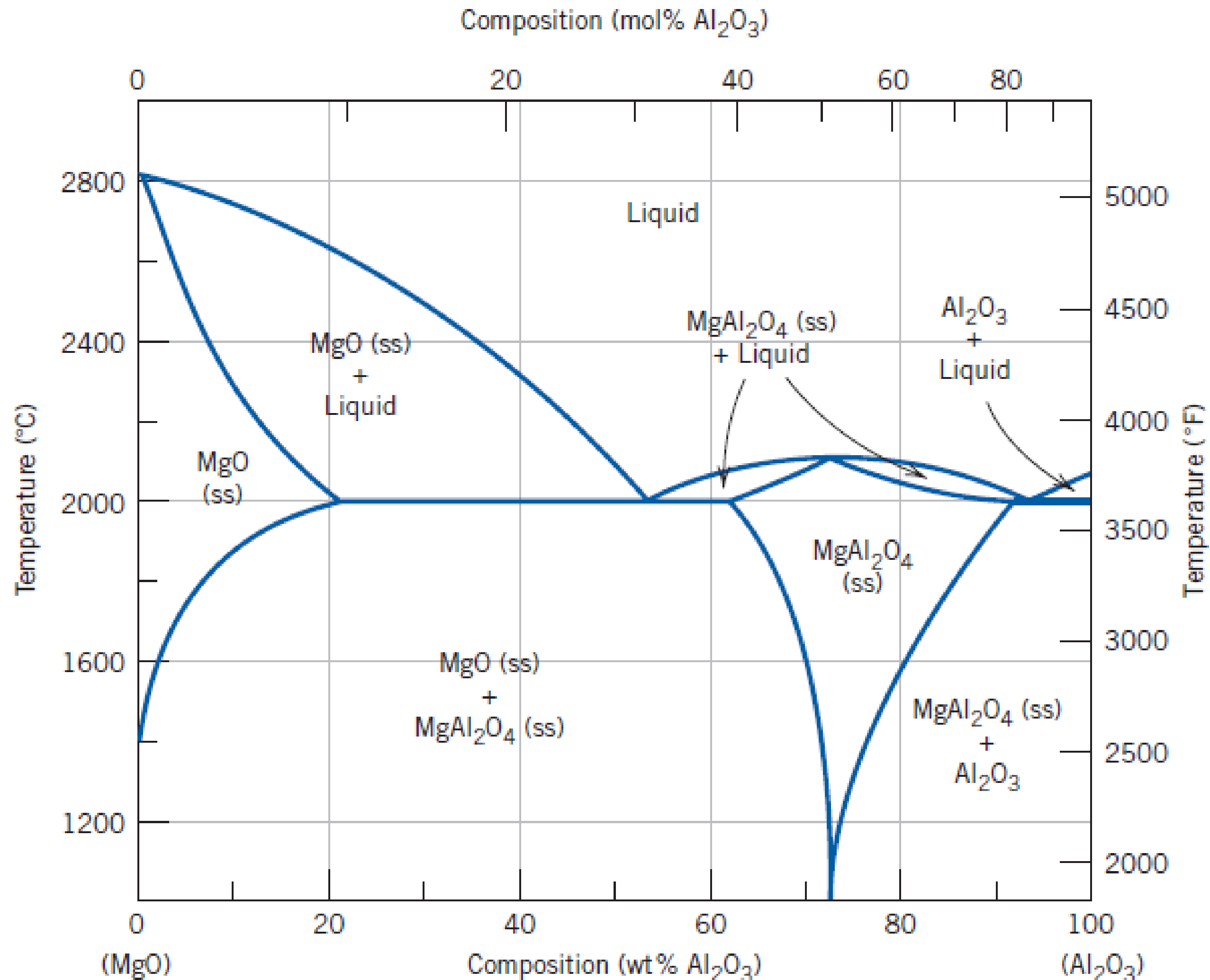


FIGURA 10-5 Celdas unitarias ordenadas de dos compuestos intermetálicos: (a) El TiAl tiene una celda tetragonal centrada en las caras, y (b) Ni_3Al tiene una red cúbica centrada en las caras.



Transformación de fase congruente: No hay alteración en la composición

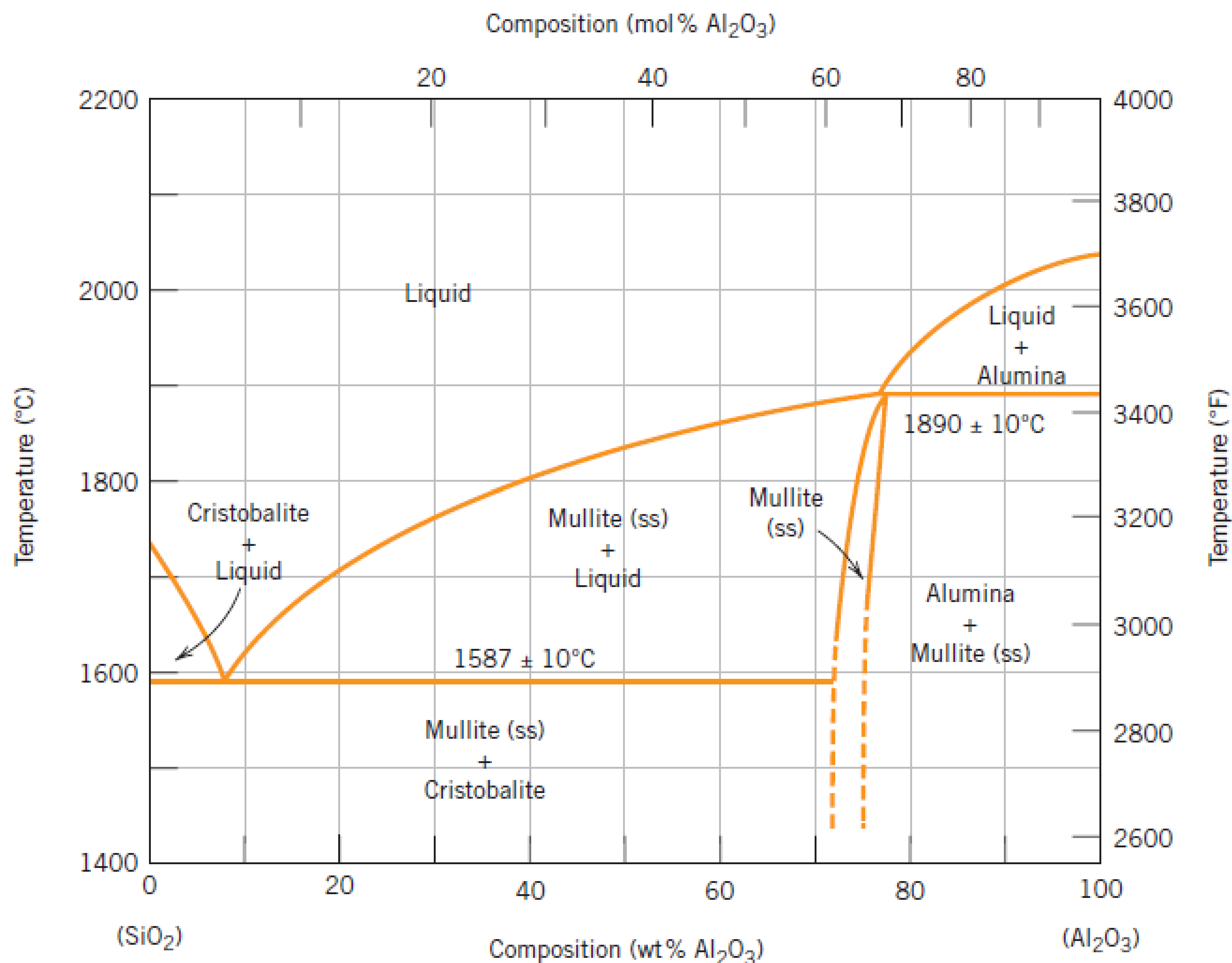
Figure 9.20 The magnesium–lead phase diagram. [Adapted from *Phase Diagrams of Binary Magnesium Alloys*, A. A. Nayeb-Hashemi and J. B. Clark (Editors), 1988. Reprinted by permission of ASM International, Materials Park, OH.]



Similar al plomo – magnesio

Se observa la presencia de una espinela $MgAl_2O_4$

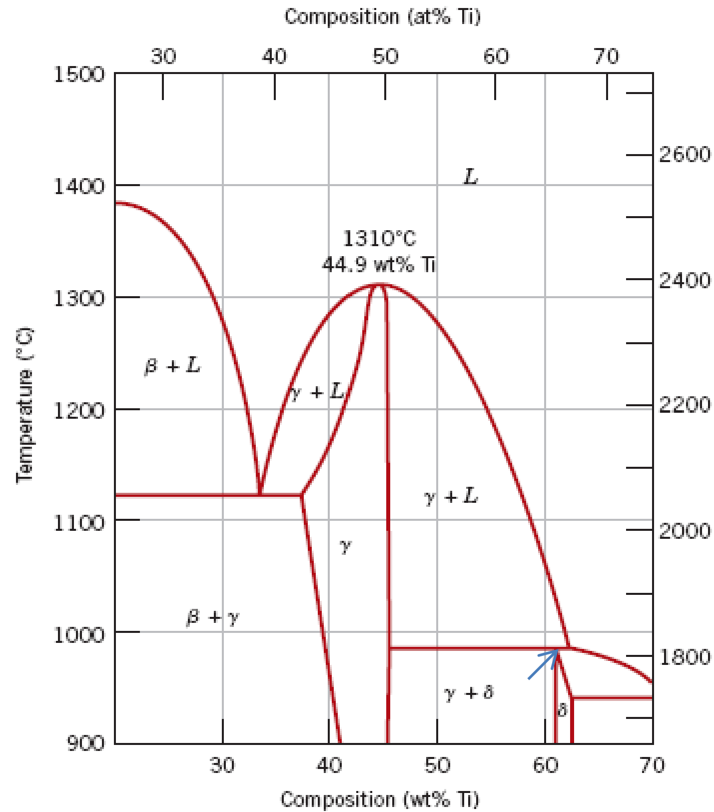
Hay dos eutécticos

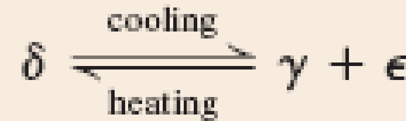


Usado en refractarios, se forma un compuesto intermetalico mullita : 3 Al_2O_3 – $2SiO_2$ (**arcilla**) **un eutéctico.**

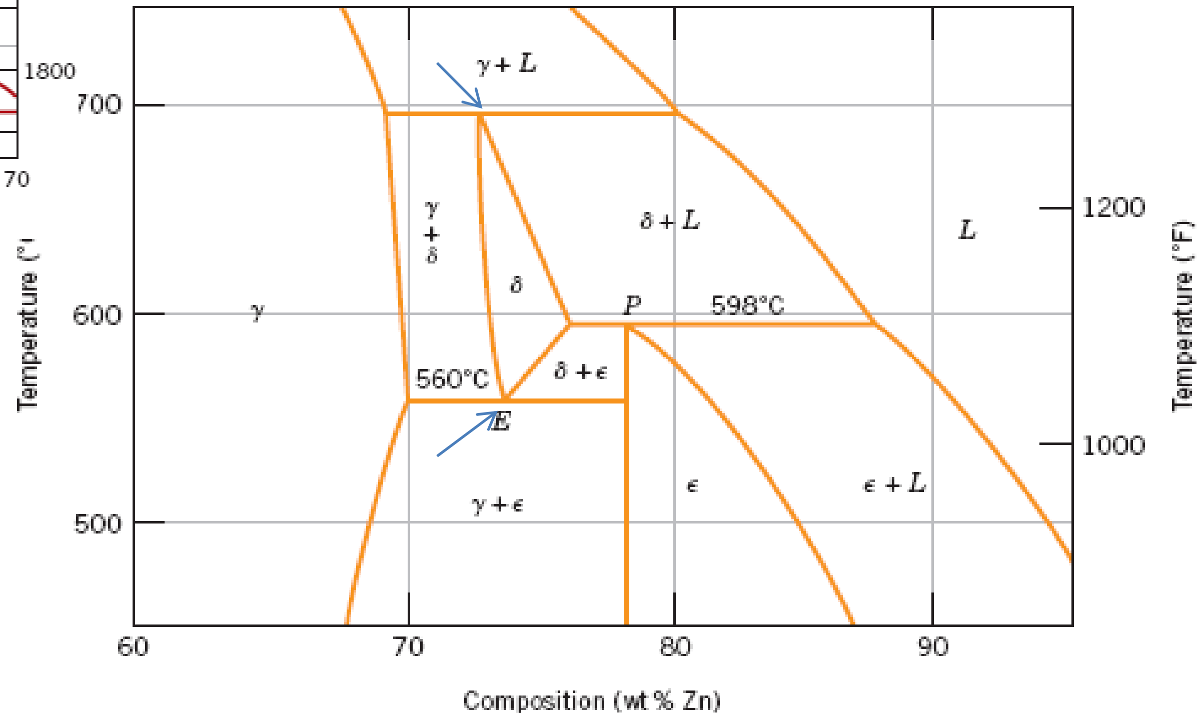
Al_2O_3 y SiO_2 no son solubles entre si.

REACCIONES EUTECTOIDE Y PERITÉCTICA





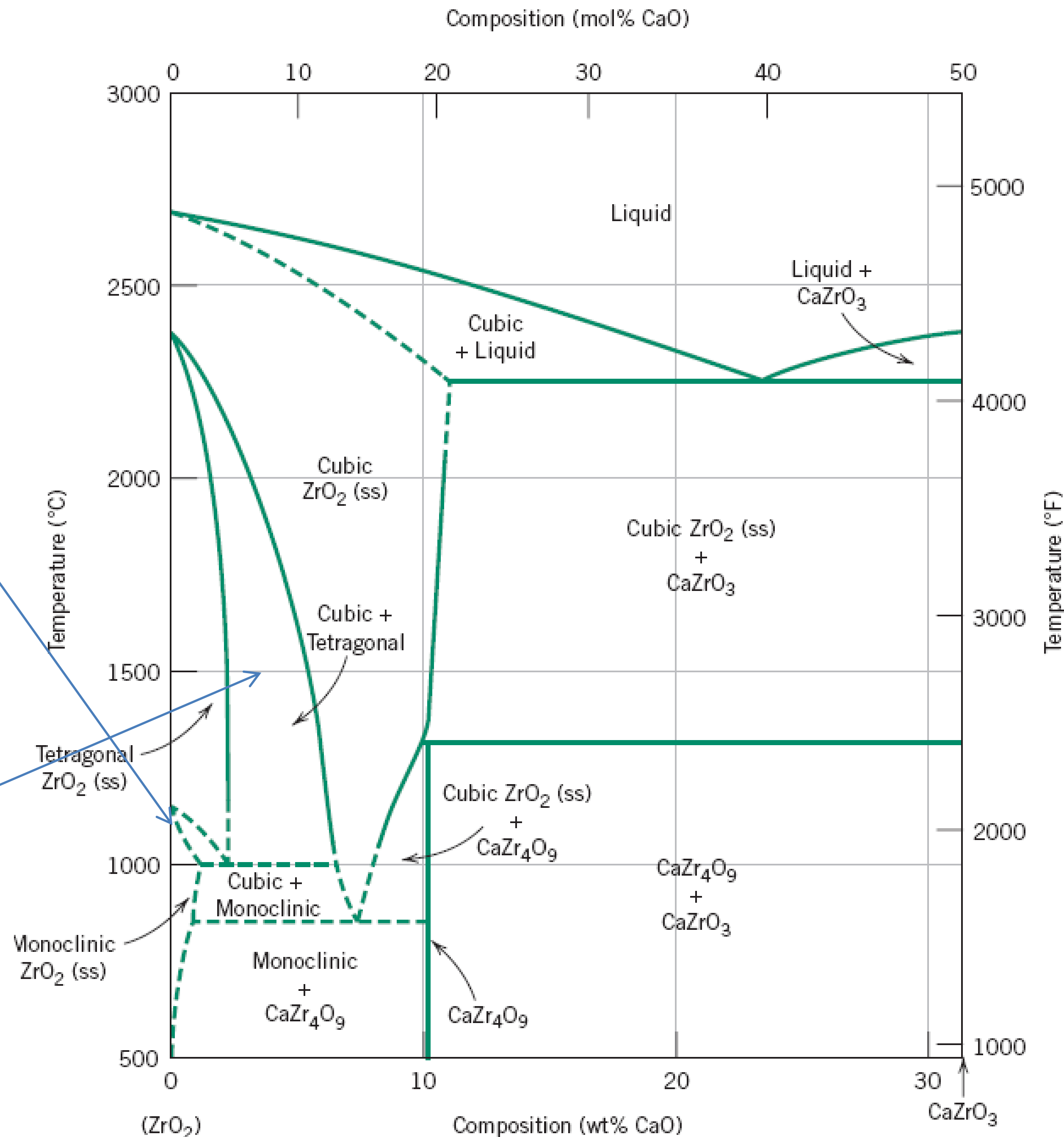




Diagramas de fase

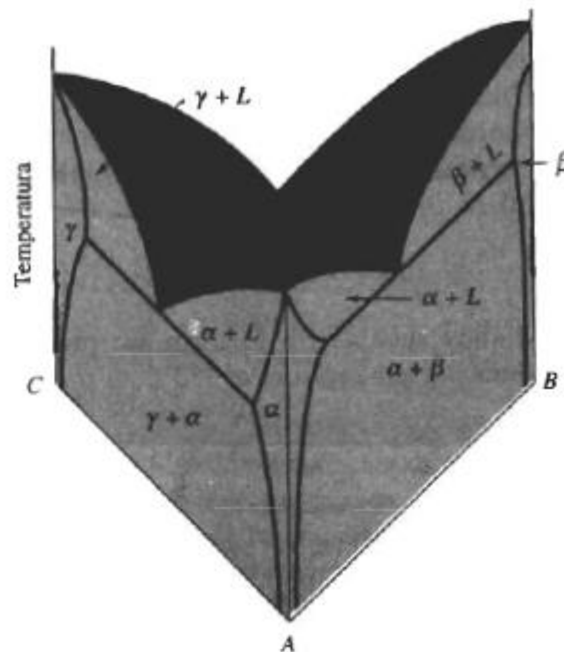
1 eutéctico y 2 eutectoides
Tres estructuras del ZrO_2: Tetragonal, monoclínica y cúbica

1. La transformación de fase tetragonal a monoclinica a 1150°C presenta un cambio grande de volumen que produce grietas
2. Con 3-7 % de CaO se estabiliza la zirconia. A temperaturas sobre los 1000°C, se forma la fase cúbica y tetragonal.
3. Al enfriarse, es decir a temperatura ambiente, no se forma la fase Monoclinica: **aparece la fase cubica y o tetragonal de la zirconia** y no hay grietas: ***PSZ***

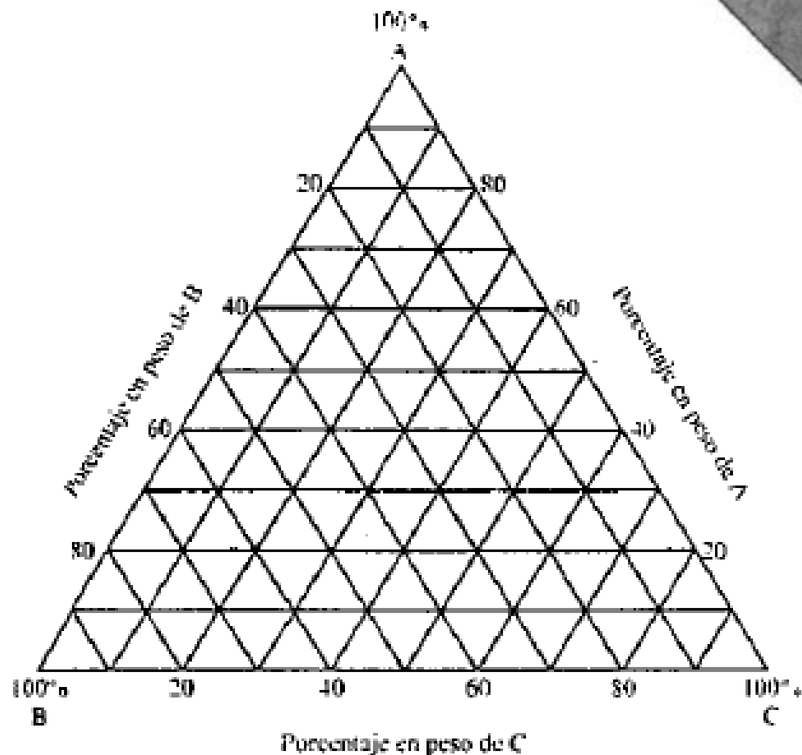


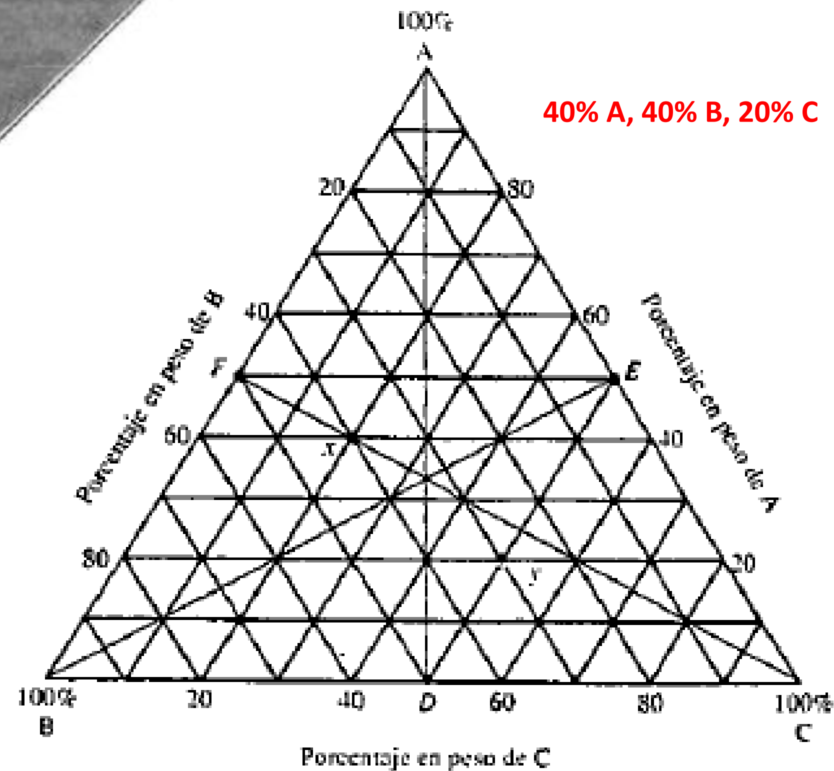
También con Y_2O_3 y óxido de magnesio

DIAGRAMA DE FASES TERNARIOS



Sección Isotérmica





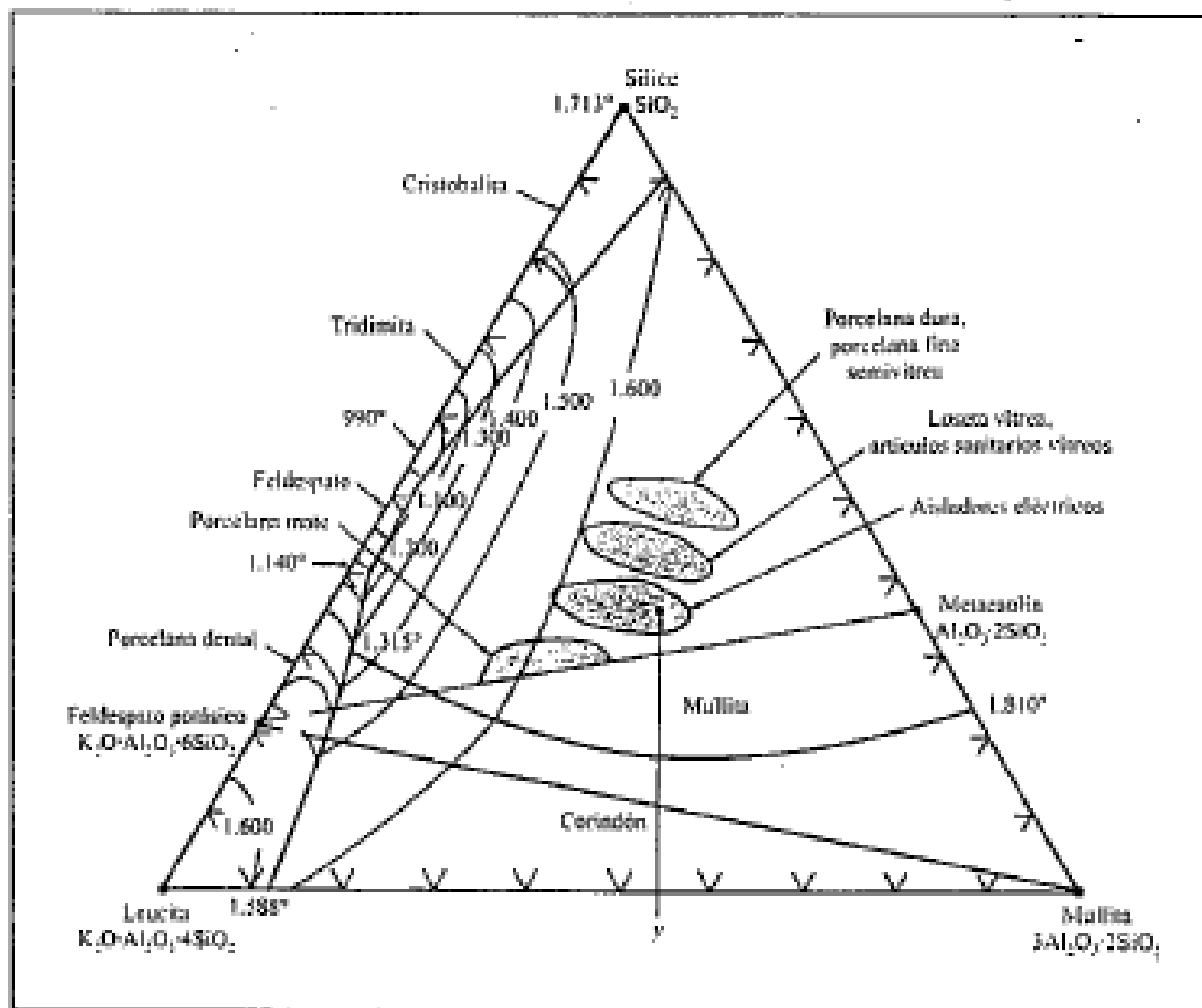
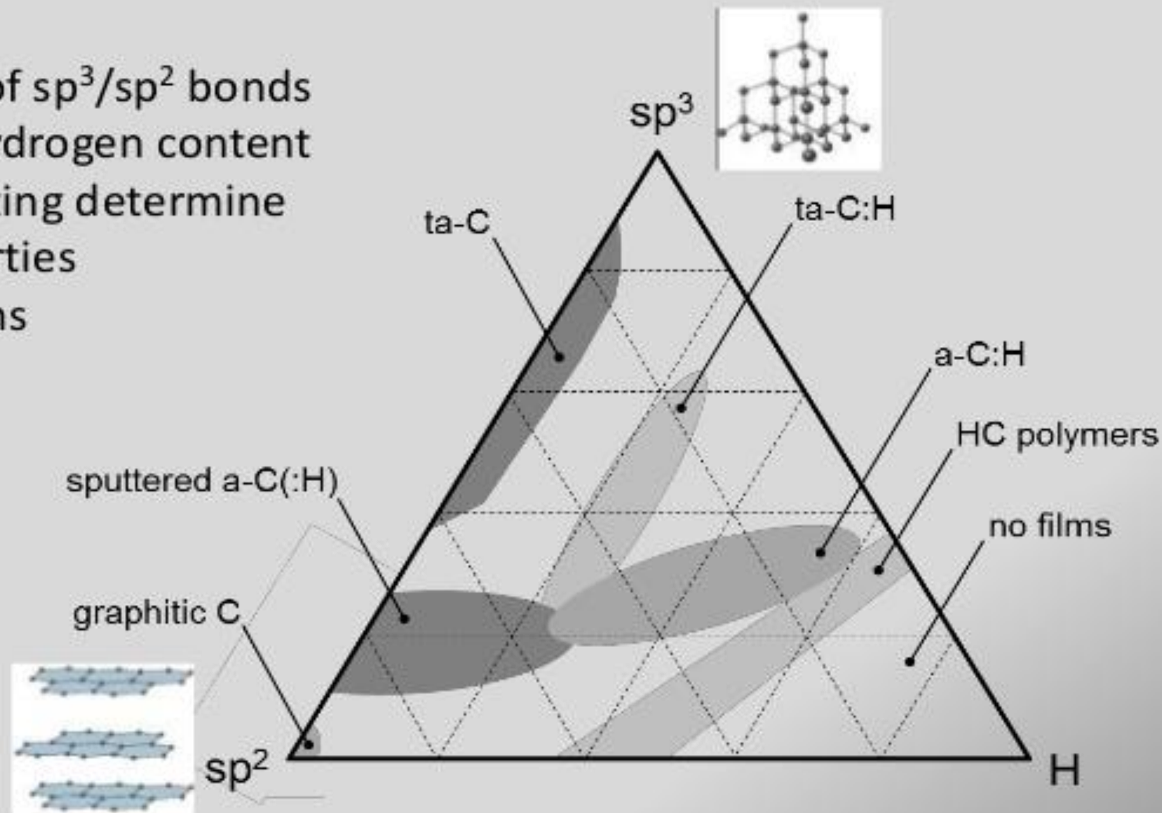


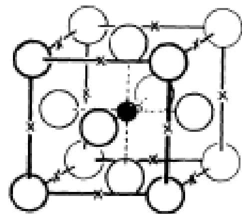
Figura 11.32. Áreas triaxiales correspondientes a composiciones de cerámica fina que se muestran sobre el diagrama de fases de equilibrio sílice-leucita-mullita. (Según W. D. Kingery, H. K. Bowen y D. R. Uhlmann, «Introduction to Ceramics», 2.ª ed., Wiley, 1976, pág. 533.)

Types of DLC Coatings

The ratio of sp^3/sp^2 bonds and the hydrogen content in the coating determine the properties of DLC films



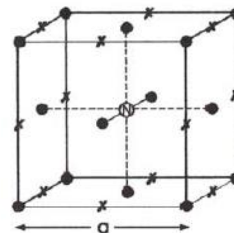
Phases	Composition	Wt. % (At. %) N	Interstitial atoms per 100 Fe atoms	Bravais Lattice
Ferrite (α)	Fe	0.10 (0.40)	-	B.c.c.
Austenite (γ)	Fe	2.8 (11)	12.4	F.c.c
Martensite (α′)	Fe	2.6 (10)	11.1	B.c. tetrag.
γ′	Fe_4N	5.9 (20)	25	Cubic
ε	Fe_2N_{1-x}	4.5-11.0 (18-32)	22 - 49.3	Hexagonal
ζ	Fe_2N	11.4 (33.3)	50	Orthorhombic

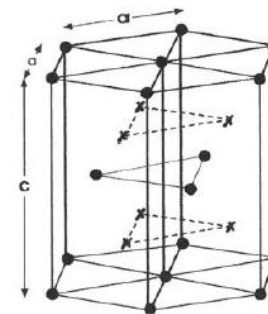


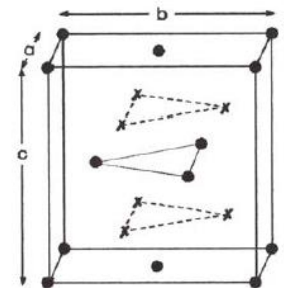
Fe_4N crystal structure

- ○ Iron Atoms
- ● Nitrogen Atom
- X Unoccupied Interstices

Estrutura cristalográfica das fases γ′, ε e ξ.





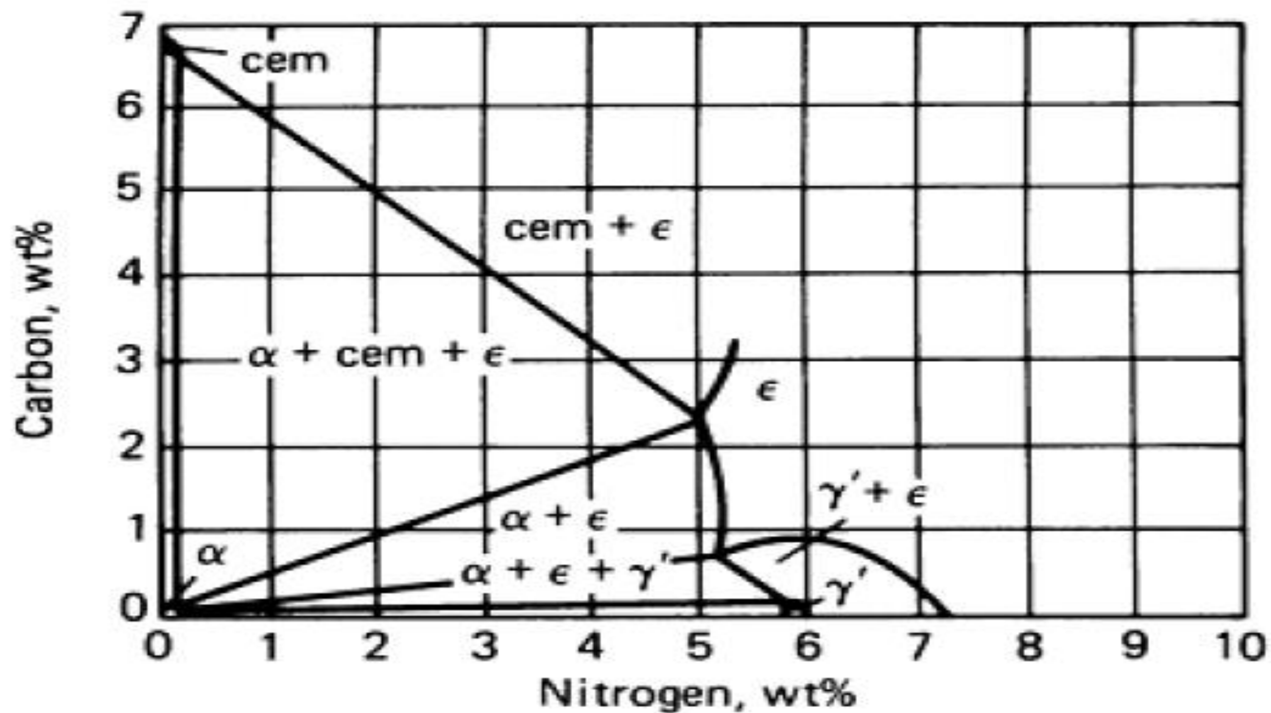


γ′ - CFC
dùctil

ε - HC
corrosiòn y desgaste

ξ - Ortorrômbica
hidrogeno

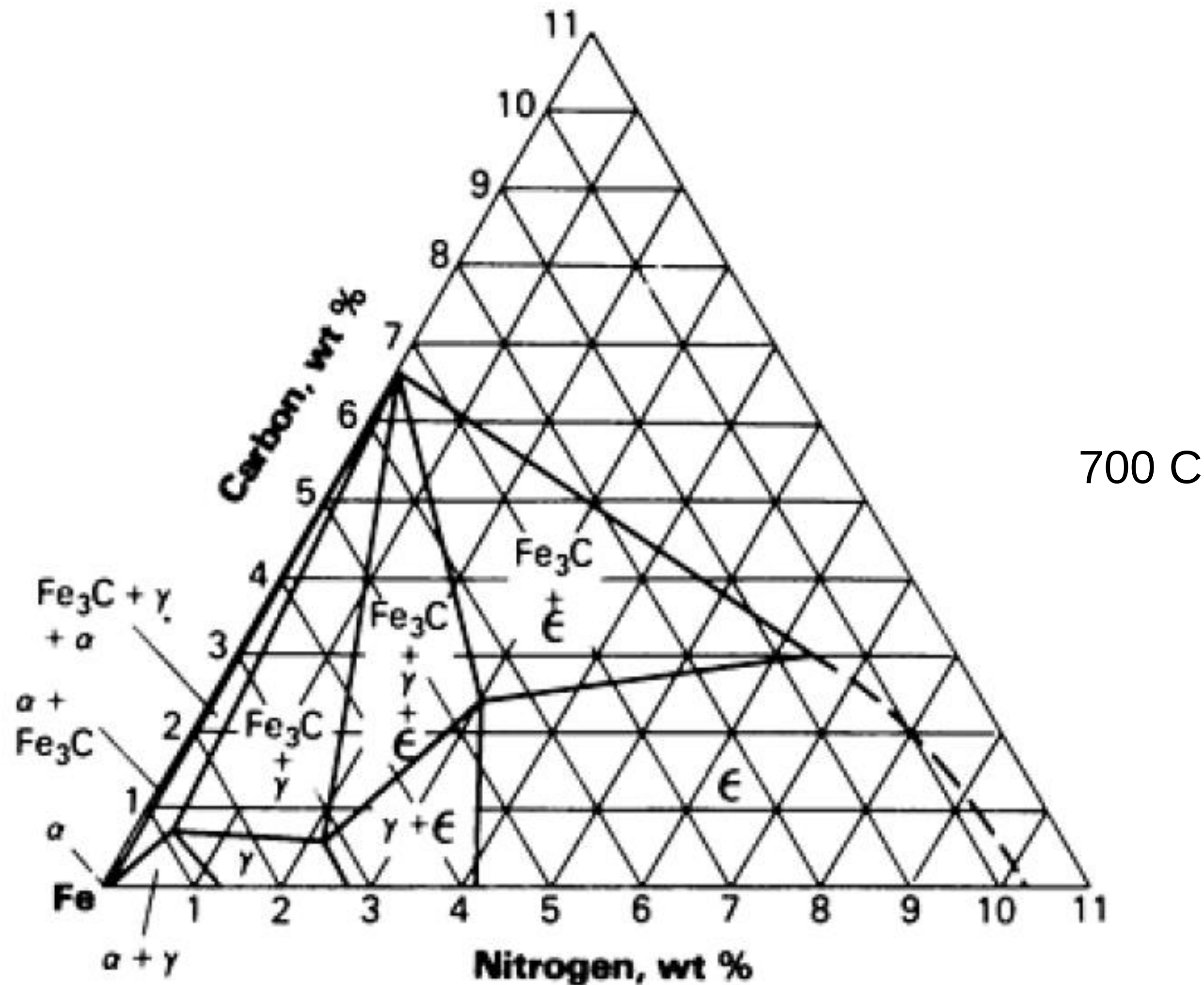
Nitrucarburaciòn Ferritica



580 C

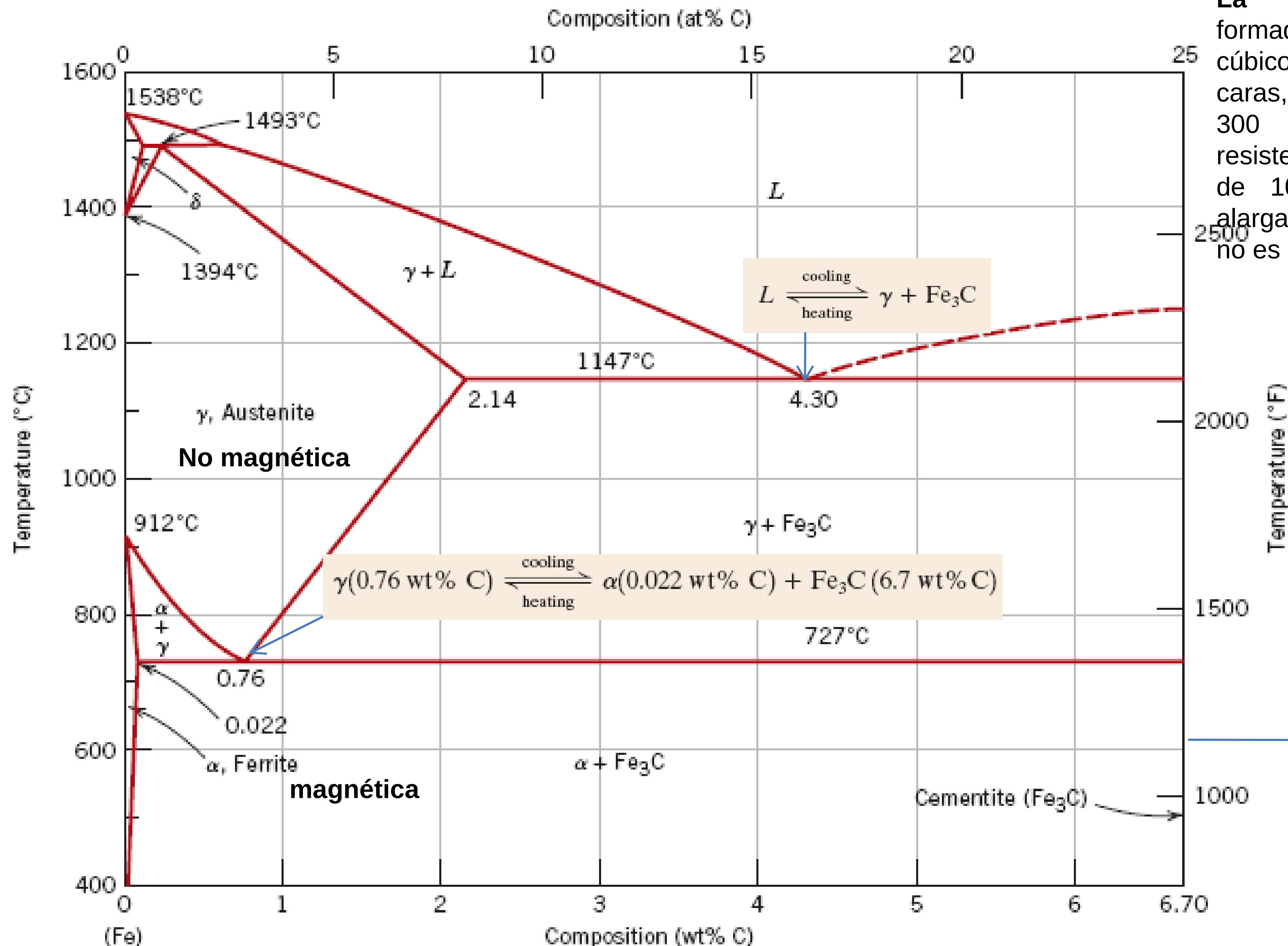
El carbono ayuda a estabilizar la fase ε- Temperaturas de 560-590 C

Nitrucarburaciòn Austenitica



El carbono ayuda a estabilizar la fase ε- Temperaturas de 700-820 C.
Hay martensita revenida en el núcleo

DIAGRAMA DE FASES $Fe\text{-}Fe_3C$



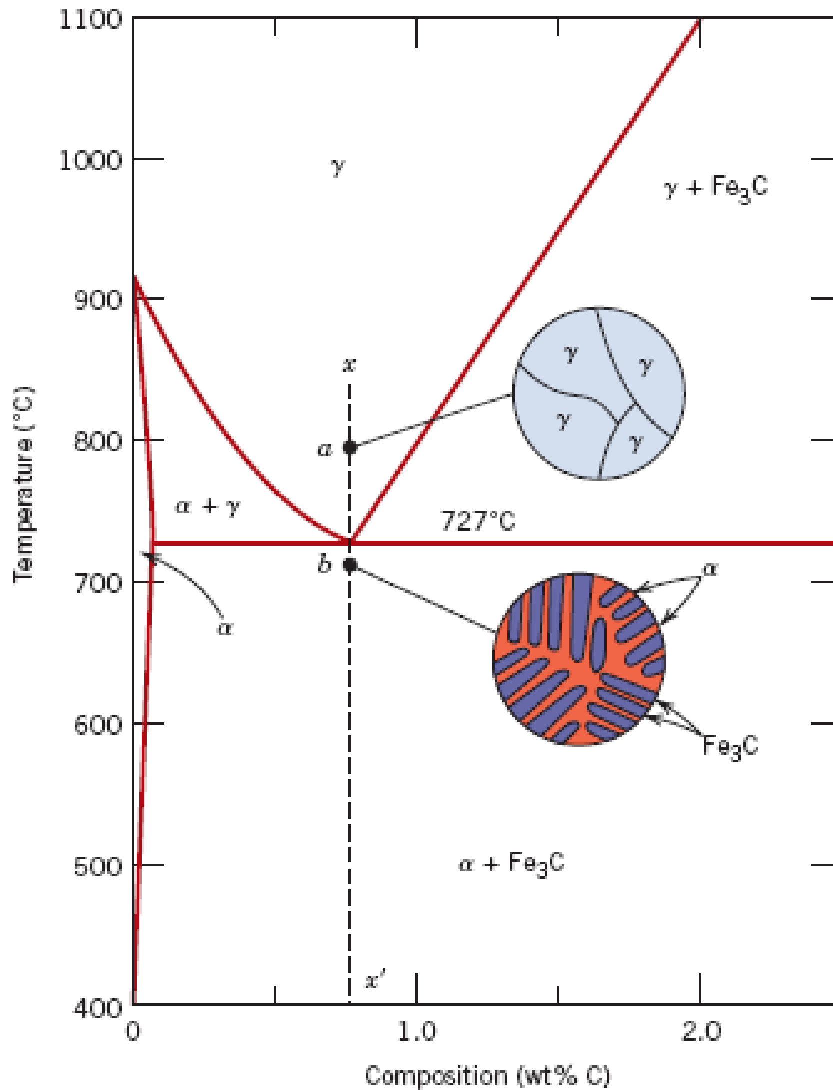
La austenita está formada por cristales cúbicos centrados en las caras, con una dureza de 300 Brinell, una resistencia a la tracción de 100 kg/mm^2 y un alargamiento del 30 %, no es magnética.

Es un componente
Velocidad de descomposición lenta
Metaestable

La ferrita es la fase más blanda y dúctil de los aceros, cristaliza en la red cúbica centrada en el cuerpo, tiene una dureza de 90 Brinell y una resistencia a la tracción de 28 kg/mm2, llegando hasta un alargamiento del 40%. La ferrita se observa al microscopio como granos poligonales claros.

EUTECTOIDE

Perlita: compuesta por el 88 % de ferrita y 12 % de cementita, contiene el 0.8 %C. Tiene una dureza de 250 Brinell, resistencia a la tracción de 80 kg/mm2 y un alargamiento del 15%.



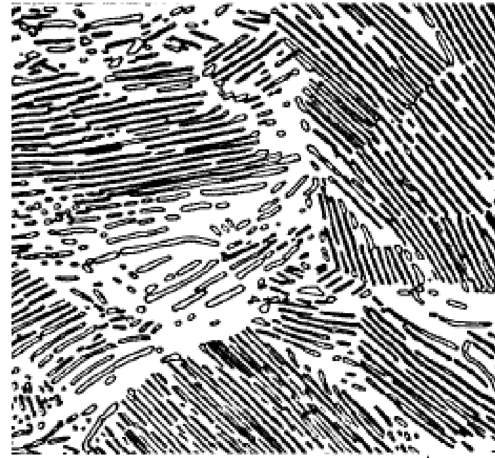
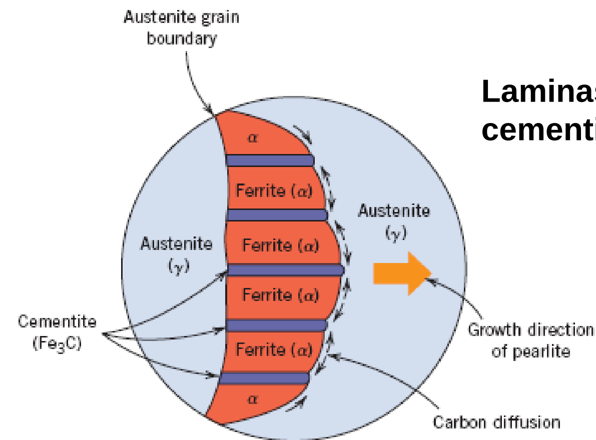
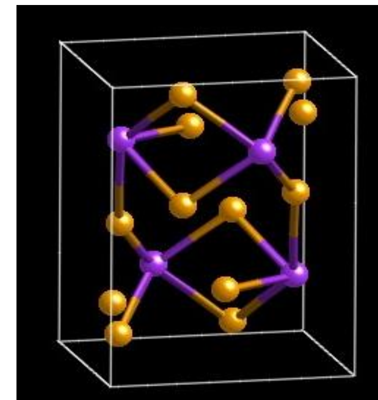


Figure 9.27 Photomicrograph of a eutectoid steel showing the pearlite microstructure consisting of alternating layers of α ferrite (the light phase) and Fe_3C (thin layers most of which appear dark). 500×. (Reproduced with permission from *Metals Handbook*, 9th edition, Vol. 9, *Metallography and Microstructures*, American Society for Metals, Materials Park, OH, 1985.)

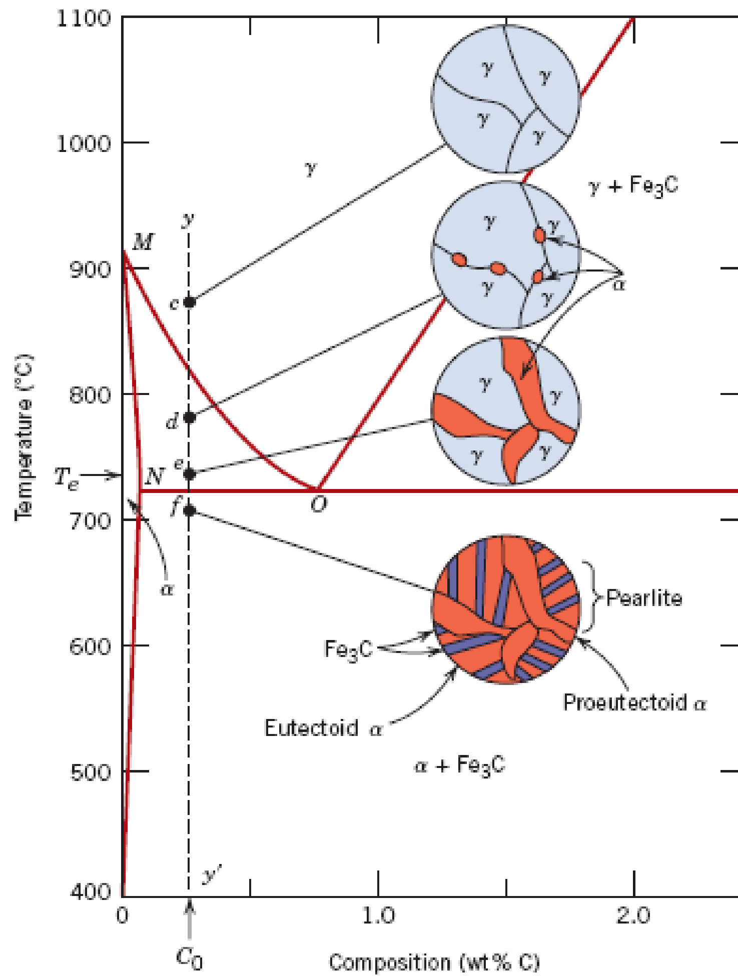


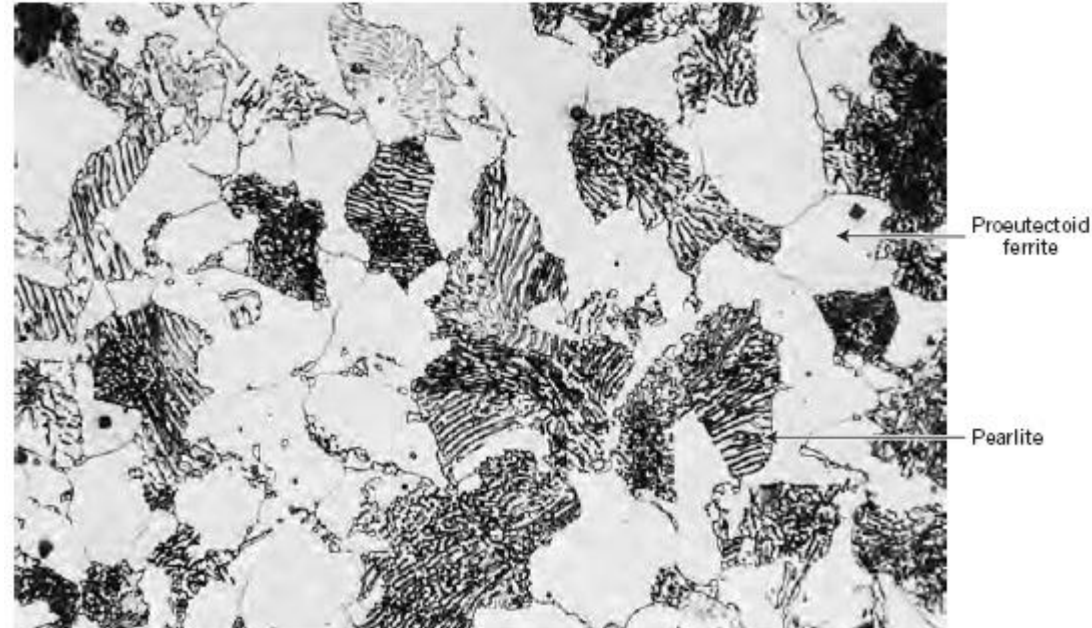
Laminas alternas de ferrita y cementita, es decir, perlita.

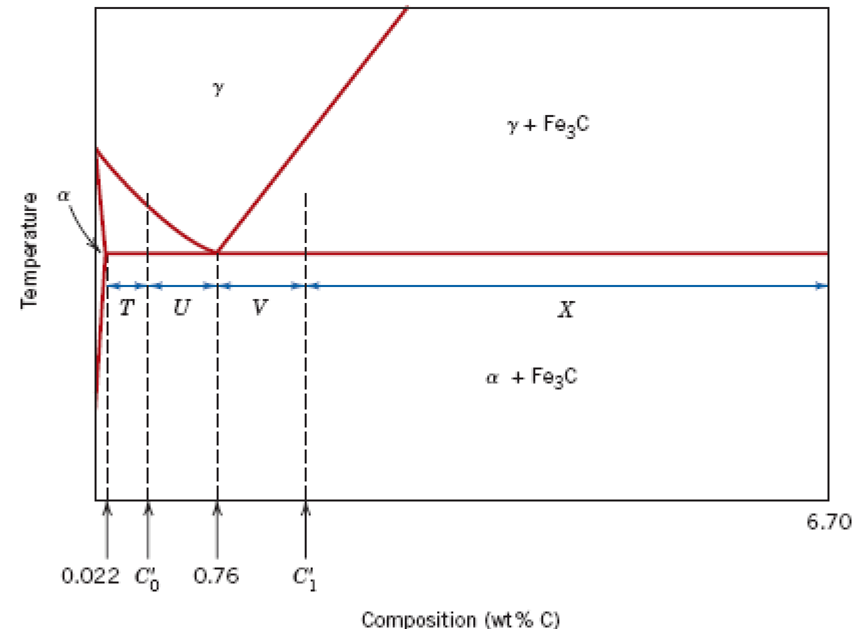
Cementita: celdas ortorrómbicas con 12 átomos de hierro (en naranja en la figura) y 4 átomos de carbono (en color morado) por celda. 700 Brinell, 68 HRC.



HIPOEUTECTOIDE







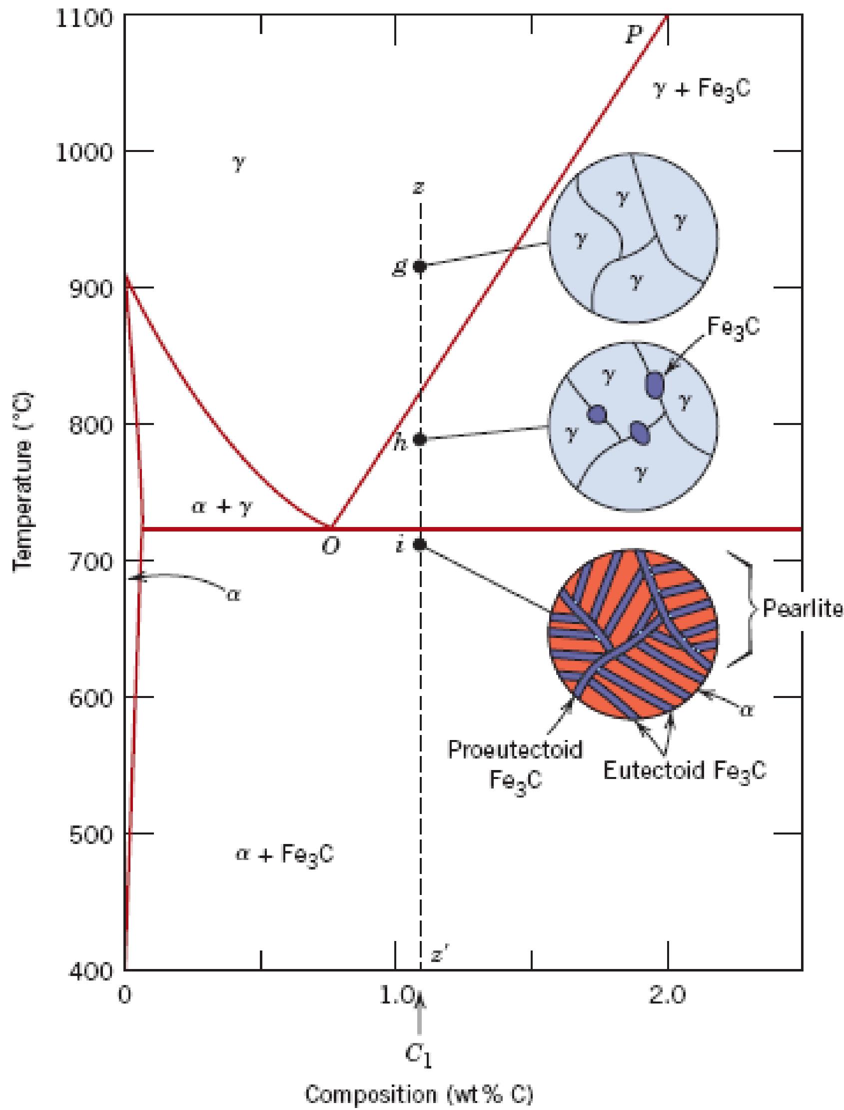
$$W_{\alpha'} = \frac{U}{T + U}$$

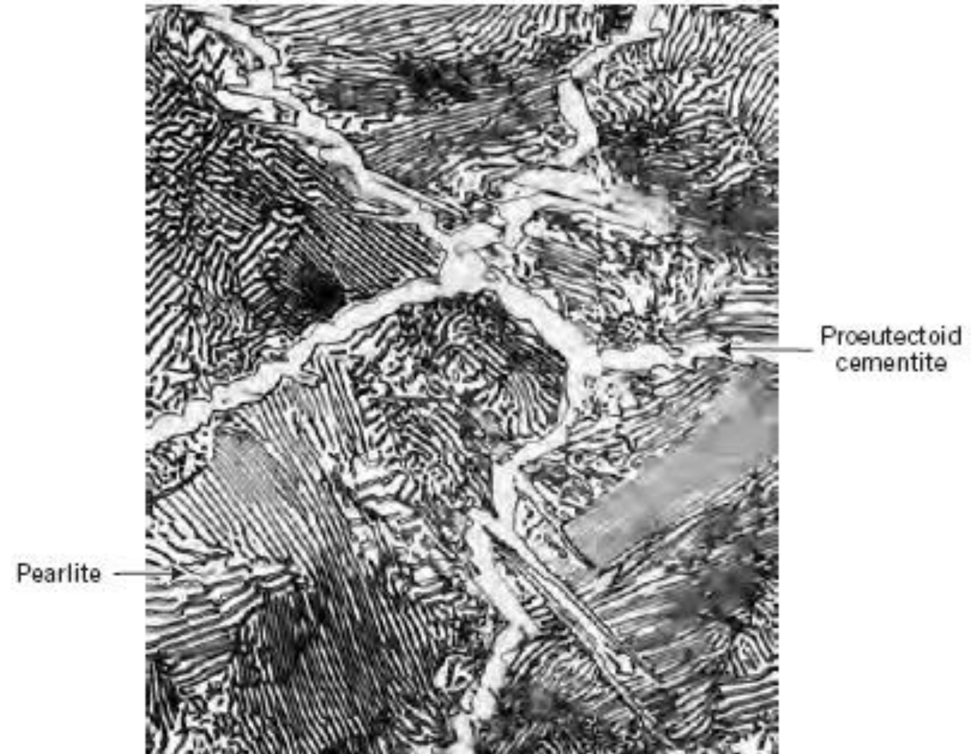
$$W_p = \frac{T}{T + U}$$

$$= \frac{0.76 - C'_0}{0.76 - 0.022} = \frac{0.76 - C'_0}{0.74}$$

$$= \frac{C'_0 - 0.022}{0.76 - 0.022} = \frac{C'_0 - 0.022}{0.74}$$

HIPEREUTECTOIDE

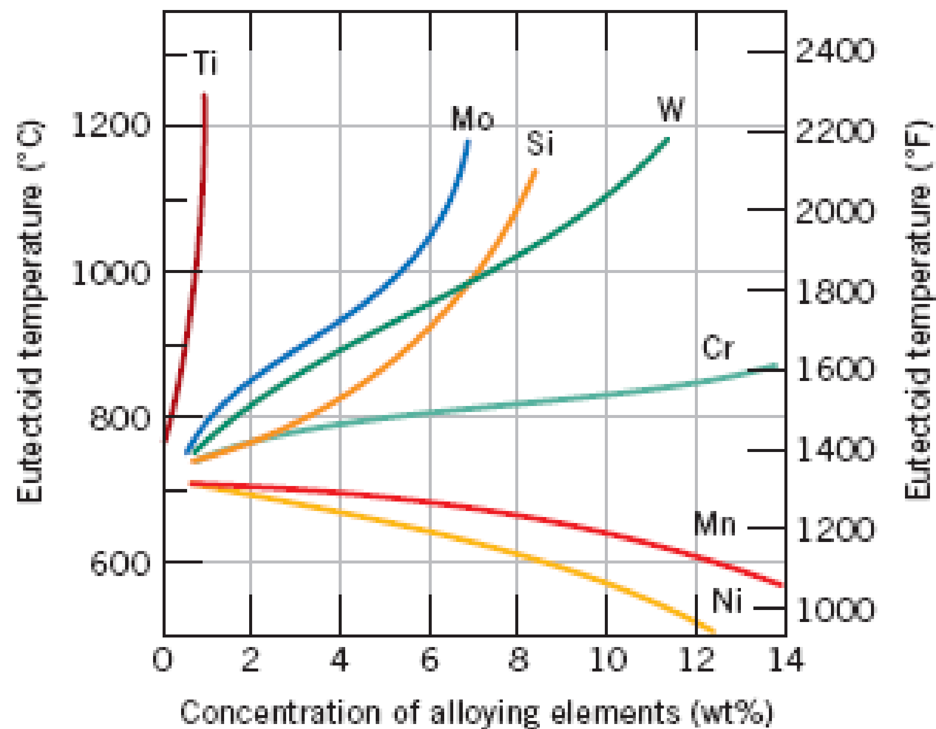


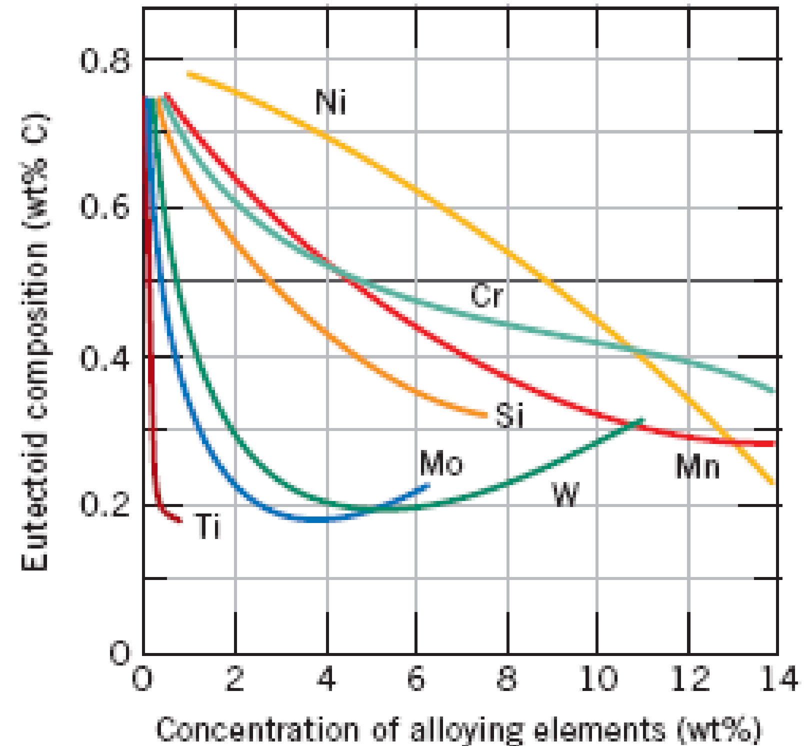


$$W_p = \frac{X}{V + X} = \frac{6.70 - C_1'}{6.70 - 0.76} = \frac{6.70 - C_1'}{5.94}$$

$$W_{Fe_3C'} = \frac{V}{V + X} = \frac{C_1' - 0.76}{6.70 - 0.76} = \frac{C_1' - 0.76}{5.94}$$

INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS ALEANTES





Para un acero con 99.65 % w de Fe y 0.35 % w de C, a una temperatura por debajo del eutectoide, determine:

1. Ferrita y cementita total.

2. Ferrita proeutectoide y perlita.

3. Ferrita eutectoide.

1. **Ferrita y cementita total.**

$$W_{\alpha} = \frac{6.70 - 0.35}{6.70 - 0.022} = 0.95$$

and

$$W_{Fe_3C} = \frac{0.35 - 0.022}{6.70 - 0.022} = 0.05$$

2. Ferrita proeutectoide y perlita.

$$W_{p} = \frac{0.35 - 0.022}{0.76 - 0.022} = 0.44$$

and

$$W_{\alpha'} = \frac{0.76 - 0.35}{0.76 - 0.022} = 0.56$$

3. **Ferrita eutectoide.**

$$W_{\alpha e} = W_{\alpha} - W_{\alpha'} = 0.95 - 0.56 = 0.39$$

Un acero tiene 8% de cementita y 92% de ferrita a temperatura ambiente. Estime el contenido de carbono del acero. Es un acero hipoeutectoide o hipereutectoide:

$$\alpha = 0.92 = \frac{6.67 - x}{6.67 - 0} \quad x = 0.53\%\ \text{C},\ \therefore\ \text{Hypoeutectoid}$$

Un acero contiene 18% de perlita y 82 % de ferrita primaria a temperatura ambiente. Estime el contenido de carbono del acero. Es un acero hipoeutectoide o hipereutectoide:

$$\text{primary}\ \alpha = 0.82 = \frac{0.77 - x}{0.77 - 0.0218},$$
$$x = 0.156\%\ \text{C},\ \therefore\ \text{Hypoeutectoid}$$

Un acero contiene 94% de perlita y 6 % de cementita primaria a temperatura ambiente. Estime el contenido de carbono del acero. Es un acero hipoeutectoide o hipereutectoide:

$$\text{Pearlite} = 0.94 = \frac{6.67 - x}{6.67 - 0.77}, \quad x = 1.124\%\ \text{C}, \therefore \text{Hypereutectoid}$$

Bibliografía

1. - Ciencia e Ingeniería de Materiales, William Smith
2. - Ciencia i. e ingeniería. de los materiales. Donald Askelan
3. - I n t r o d u c c i ó n a l a Ciencia e Ingeniería de los Materiales. W i l l ik m d C a l l i s t e r
4. - Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros para, 6 ta edición, Shackelford
5. - Introducción a la Física del Estado Sólido, Charles Kittel
6. - Introducción a la Metalurgia Física. Sydney Avner
6. - Tesis de doctorado, Fabio Castillejo
7. - Tesis de doctorado, Hector Cifuentes
8. - Principios de tratamientos superficiales, Alvaro Castro
9. - Notas de clase y metal handbook, capítulos 4 y 5.
10. - Algunas paginas de Google, por ejemplo:

https://es.slideshare.net/MartnQuiroga/estructura-de-los-silicatos-81075471,
http://www.iim.unam.mx/revista/pdf/numero1.pdf,
https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-15563/Tecto%206.pdf,
https://es.slideshare.net/leugim89/zeolitas-28464310

ESTRUCTURAS CRISTALINAS

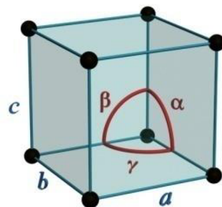
Un material cristalino tienen los átomos o iones en una **disposición repetitiva** a lo largo de distancias atómicas, es decir, tienen **un orden atómico de largo alcance**. En un sólido, los átomos se organizan en un patrón tridimensional. Ej: todos los metales, muchos cerámicos y algunos polímeros.

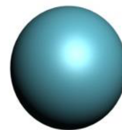
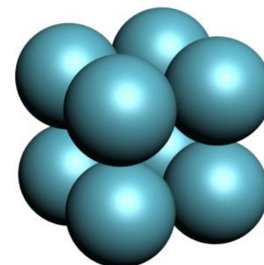
La red es una colección de puntos ordenados en un patrón periódico, de tal modo que los alrededores de cada punto de la red son idénticos.

Un motivo, motif o base describe **un grupo de uno o más átomos** ubicados en forma determinada entre si, y asociados con cada punto de red.

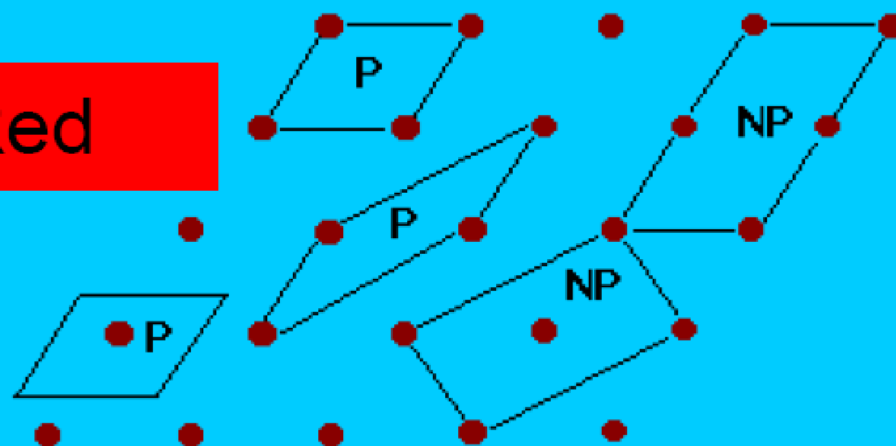
La estructura cristalina esta relacionada con la forma que los átomos, iones y moléculas están ordenados en el espacio.

La estructura cristalina es el resultado de la suma de la red y la base

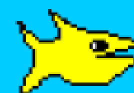


+

=


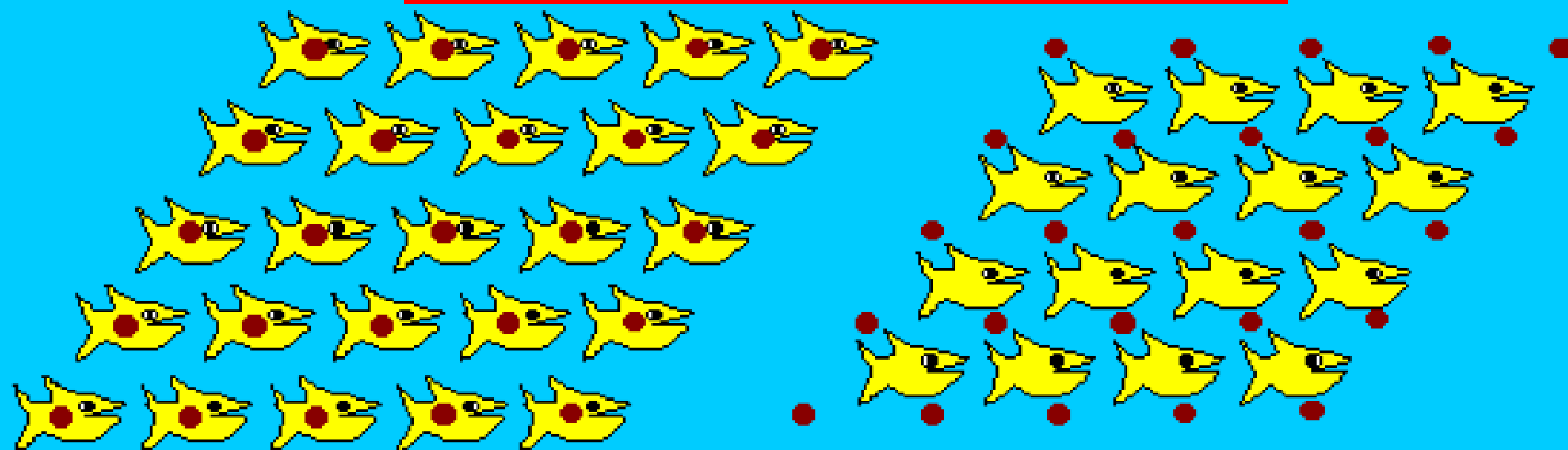
Red



Base o motivo



Cristal



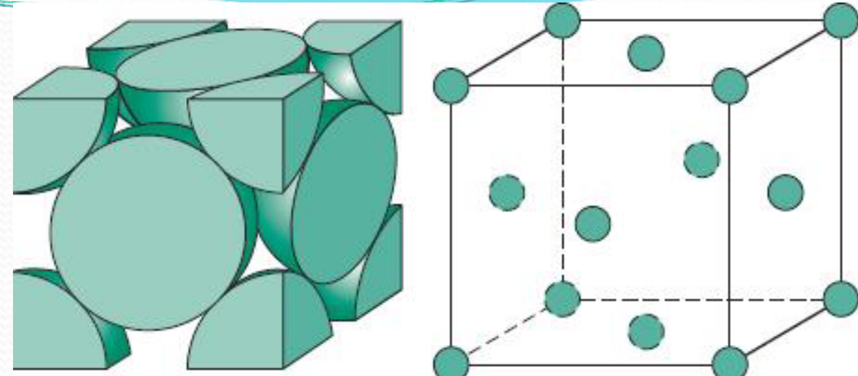
CELDA UNIDAD

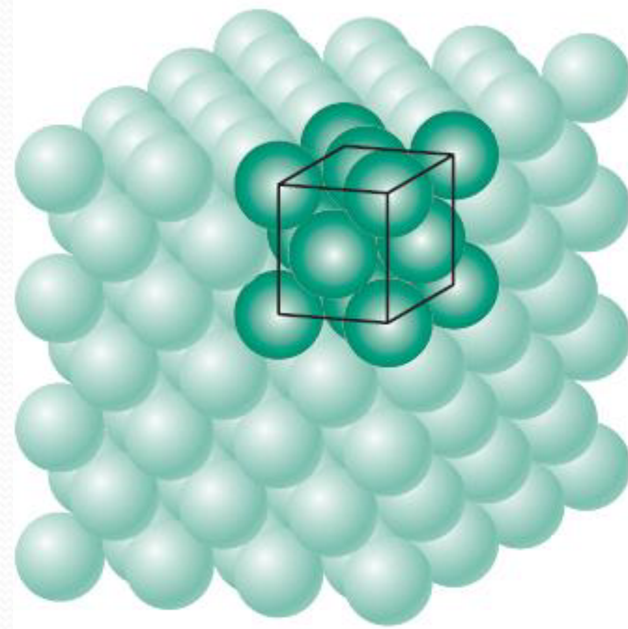
- Es la **unidad estructural** - define la estructura cristalina mediante su **geometría y por la posición de los átomos** dentro de ella

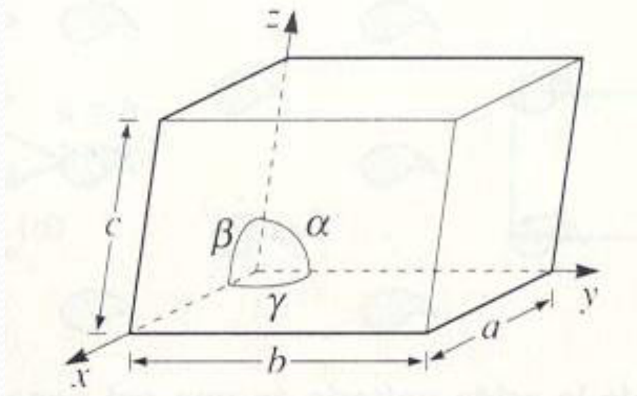
- Es la **subdivisión de una red** que sigue conservando las características generales de toda la red.

- **Menor unidad** que, por **repetición indefinida**, genera el sólido cristalino.

- Paralelepípedo definido a partir de las **longitudes axiales de las aristas independientes a, b y c y de los tres ángulos interaxiales α, β y γ**







Celdas Unitarias
7 Sistemas cristalinos

-Se establece un sistema de coordenadas x, y y z cuyo origen coincide con un vértice de la celdilla y las aristas del paralelepípedo de salen del vértice.

-La geometría de la celdilla se define en función de seis parámetros: la longitud de los parámetros a, b y c y los tres ángulos α, β, y γ. : PARAMETROS DE RED.

- Esta combinación genera 7 sistemas cristalinos.

1. Primitiva o simple – Un átomo por celda
2. Centrada en el cuerpo – Dos átomos por celda
3. Centrada en las caras – Cuatro cuerpos por celda
4. Centrada en las bases –Dos átomos por celda

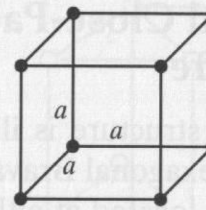
Crystal System	*Axial Relationships*	*Interaxial Angles*	*Unit Cell Geometry*
Cubic	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90°$	
Hexagonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90°, \gamma = 120°$	
Tetragonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90°$	
Rhombohedral (Trigonal)	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90°$	
Orthorhombic	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90°$	
Monoclinic	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90° \neq \beta$	
Triclinic	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90°$	

14 REDES DE BRAVAIS

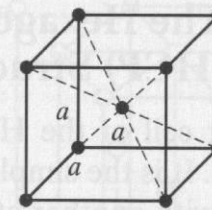
Que aparecen de siete sistemas cristalinos y los puntos de red que están en los esquinas, sobre las caras o en el centro de la celda.

System	Axial Lengths and Angles	Bravais Lattice	Lattice Symbol
Cubic	Three equal axes at right angles $a = b = c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90°$	Simple Body-Centered Face-Centered	P I F
Tetragonal	Three axes at right angles, two equal $a = b \neq c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90°$	Simple Body-Centered	P I
Orthorhombic	Three unequal axes at right angles $a \neq b \neq c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90°$	Simple Body-Centered Base-Centered Face-Centered	P I C F
Rhombohedral	Three equal axes, equally inclined $a = b = c$; $\alpha = \beta = \gamma \neq 90°$	Simple	P
Hexagonal	Two equal coplanar axes at 120° Third axis at right angles $a = b \neq c$; $\alpha = \beta = 90°$, $\gamma = 120°$	Simple	P
Monoclinic	Three unequal angles, one pair not at right angles; $a \neq b \neq c$; $\alpha = \gamma = 90° \neq \beta$	Simple Base-Centered	P C
Triclinic	Three unequal axes, unequally inclined; none at right angles $a \neq b \neq c$; $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90°$	Simple	P

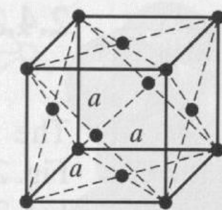
REDES CRISTALINAS TIPICAS EN LOS MATERIALES



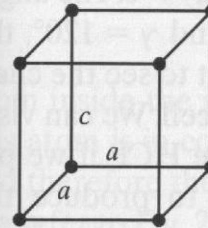
Simple cubic (*P*)



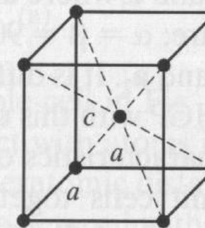
Body-centered cubic (*I*)



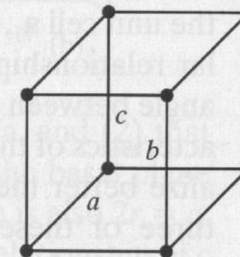
Face-centered cubic (*F*)



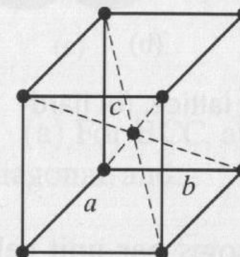
Simple tetragonal (*P*)



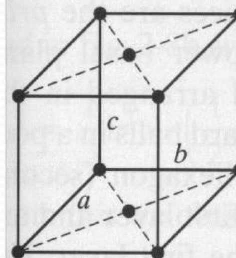
Body-centered tetragonal (*I*)



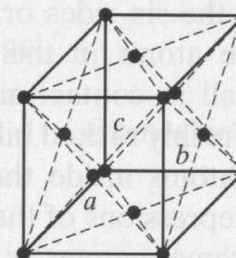
Simple orthorhombic (*P*)



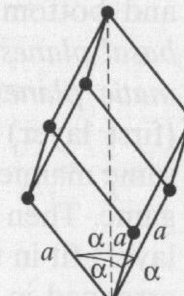
Body-centered orthorhombic (*I*)



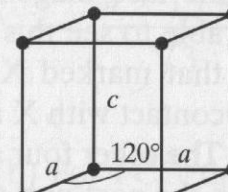
Base-centered orthorhombic (*C*)



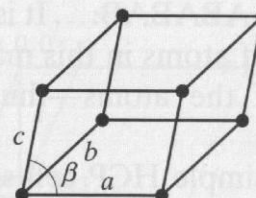
Face-centered orthorhombic (*F*)



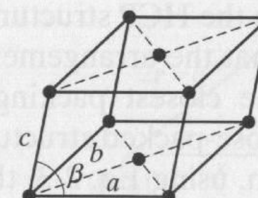
Rhombohedral (*R*)



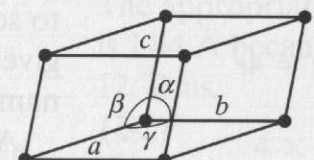
Hexagonal (*P*)



Simple monoclinic (*P*)



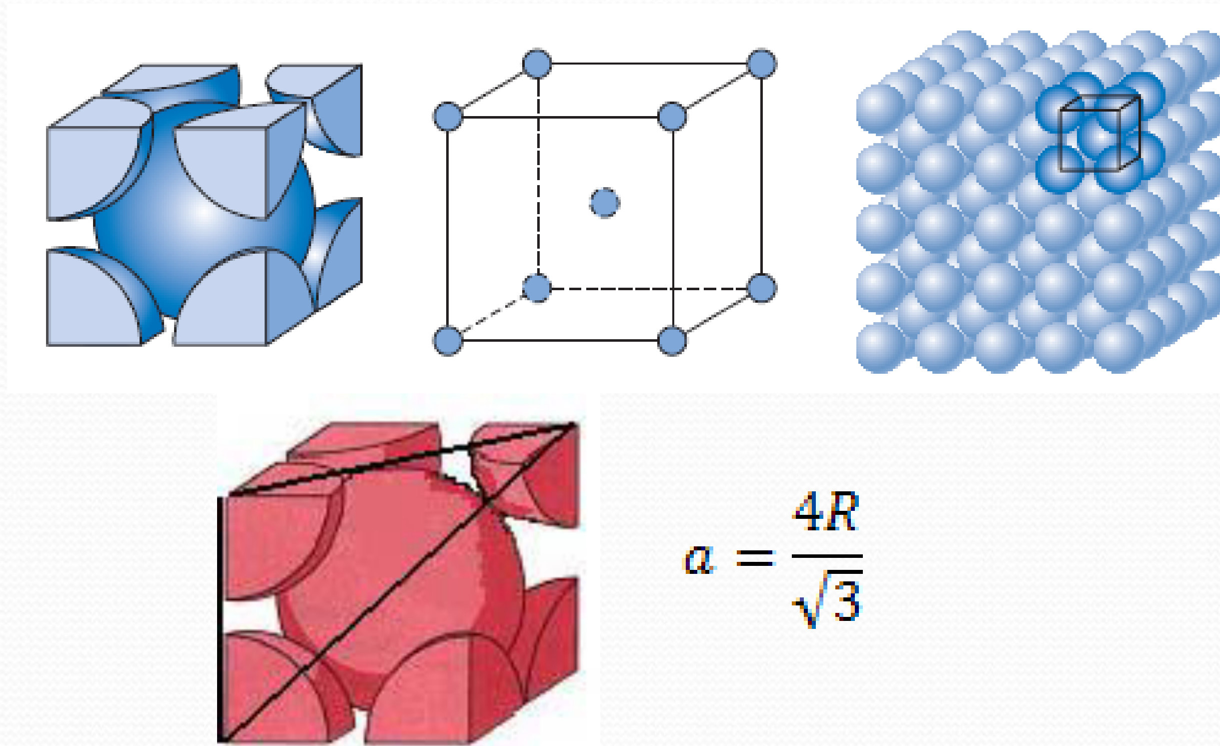
Base-centered monoclinic (*C*)



Triclinic (*P*)

ESTRUCTURA BCC

CUBICA CENTRADA EN EL CUERPO

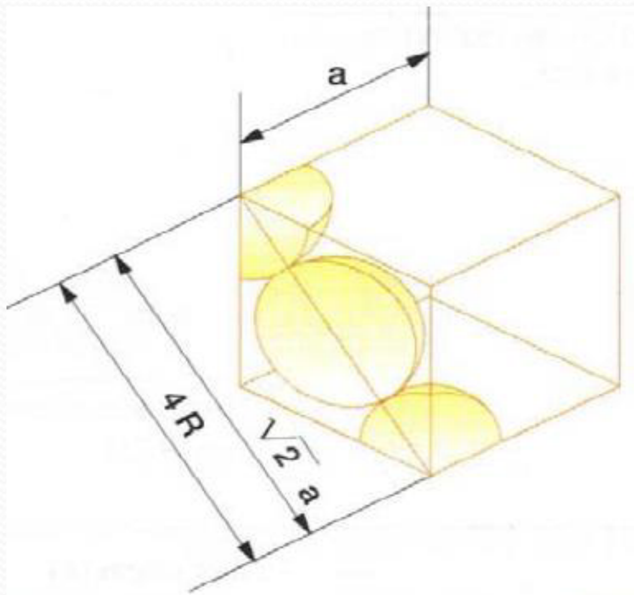


$$a = \frac{4R}{\sqrt{3}}$$

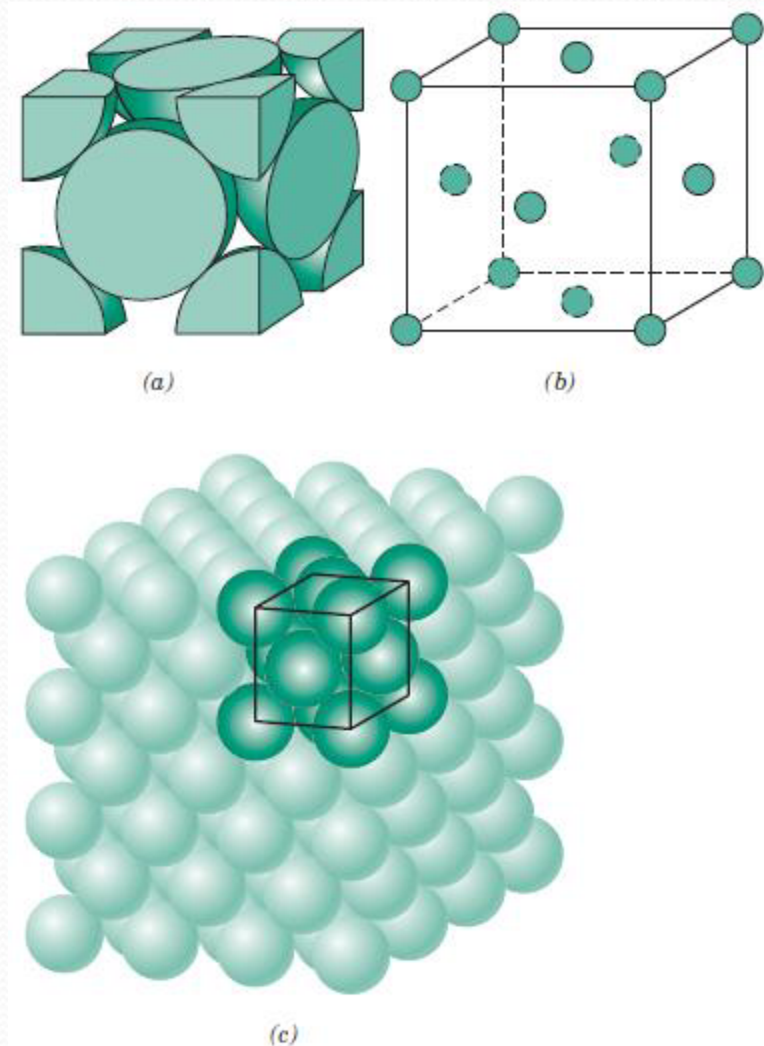
- **Hierro, Titanio, Tungsteno, Molibdeno, Niobio, Tantalio, Potasio, Sodio, Vanadio, Cromo y Zirconio.**
- **Cada celdilla tiene asociado 2 átomos. El número de coordinación es de 8. El factor de empaquetamiento es de 0.68.**

ESTRUCTURA FCC

Cúbica Centrada en la Cara

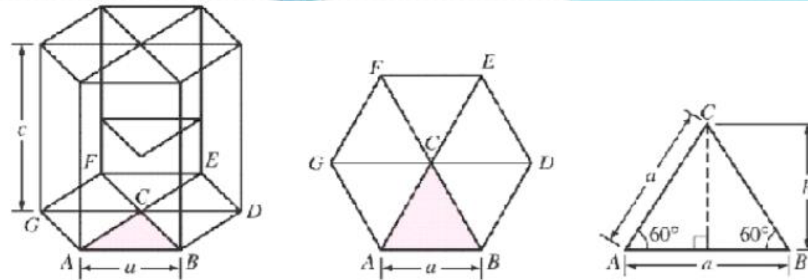


$$a = 2R\sqrt{2}$$

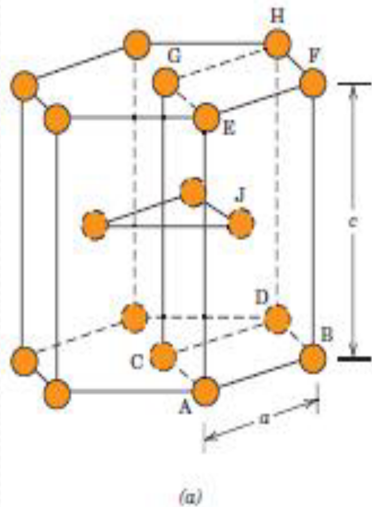


- **Hierro, Oro, Cobre, Aluminio, Nickel, Plata, Plomo, Platino. Tiene 4 átomos, el factor de empaquetamiento es de 0.74 y un número de coordinación de 12**

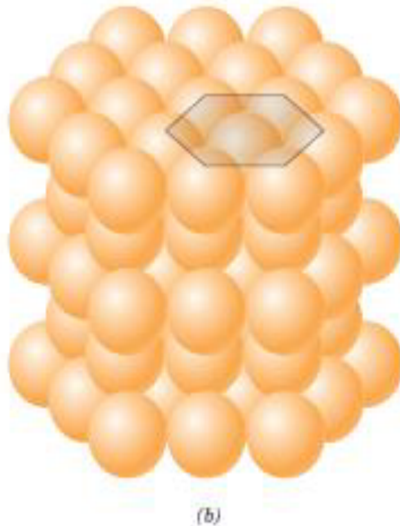
ESTRUCTURA HCP

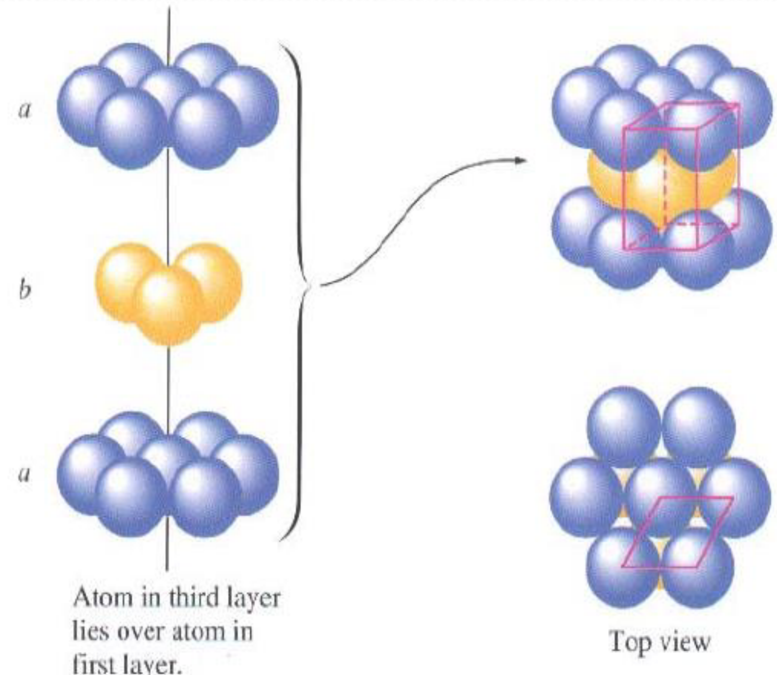


Hexagonal de alto empaquetamiento.



(a)


(b)

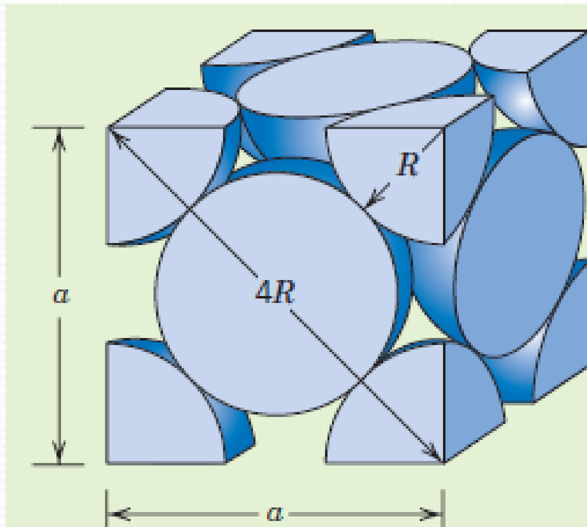


c/a=1.633 a=2r

- Titanio, Magnesio, Zinc, Berilio, Cobalto, Zirconio, Cadmio. Factor de empaquetamiento de 0.74. Número de átomos 6. Número de coordinación 12

FACTOR DE EMPAQUETAMIENTO

$$APF = \frac{\text{volume of atoms in a unit cell}}{\text{total unit cell volume}} = \frac{V_S}{V_C}$$



$$a^2 + a^2 = (4R)^2 \rightarrow a = 2R\sqrt{2}$$

$$V_C = a^3 = (2R\sqrt{2})^3 = 16R^3\sqrt{2}$$

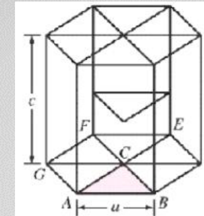
$$V_S = (4)\tfrac{4}{3}\pi R^3 = \tfrac{16}{3}\pi R^3$$

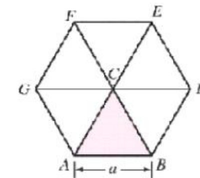
$$APF = \frac{V_S}{V_C} = \frac{(\frac{16}{3})\pi R^3}{16R^3\sqrt{2}} = 0.74$$

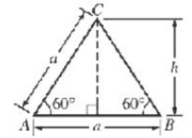
Calcular el factor de empaquetamiento de la celda unidad de la estructura cristalina del Mg teniendo en cuenta los siguientes datos:

El Mg puro tiene una estructura HCP;
Con unas constantes de red de: a = 0.3209 nm y c= 0,5209 nm.

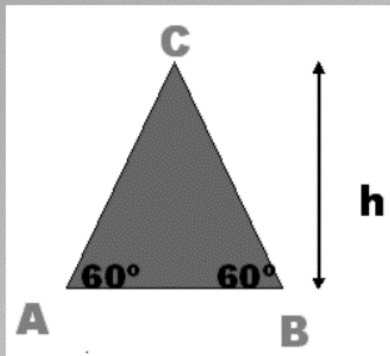
$$APF = \frac{volumen\ de\ átomos\ de\ celda\ unidad}{Volumen\ de\ la\ celda\ unidad}$$







$V_{celda\ unidad}$ = A de la base de la celda unidad X h



$Area_{triángulo\ ABC} = (½)\ b \times h$

$= (½)\ a\ (a\ sen\ 60°)$

$= (½)\ a^2\ sen\ 60°$

$A_{total\text{-}base} = 6(1/2)a^2 sen60° = 3a^2 sen\ 60°$

$V_{celda\ unidad} = (3)(0{,}3209\ nm)^2(0{,}8660)(0{,}5209nm)$

$= 0.139358\ nm^3$

$$APF = \frac{volumen\ de\ átomos\ de\ celda\ unidad}{Volumen\ de\ la\ celda\ unidad}$$

$V_{\text{átomos celda-unidad}} = 6\ (4/3\ \Pi\ R^3)$

$= 6(4/3\ \Pi\ (0{,}160\ nm)^3$

$= 0{,}102944\ nm^3$

Reemplazando:

APF $= 0{,}102944\ nm^3 / 0.139358\ nm^3$

$= 0.74$

ESTRUCTURAS TIPICAS DE METALES

ESTRUCTURA	SIGLA	a_0	No de átomos en la celda	No de coordinación o de vecinos	Dirección de tangencia permanente	F.E.
CUBICA SIMPLE	CS	2ra	1	6	Lado del cubo	0.52
CUBICA DE CUERPO CENTRADO	BCC	$4ra/\sqrt{3}$	2	8	Diagonal del cubo	0.68
CUBICA DE CARA CENTRADA	FCC	$4ra/\sqrt{2}$	4	12	Diagonal de la cara	0.74 *
HEXAGONAL CENTRADA EN LA CARA	HCP	a = 2r c/a= 1.666	6	12	Caras hexagonales	0.74 *

Planos y direcciones

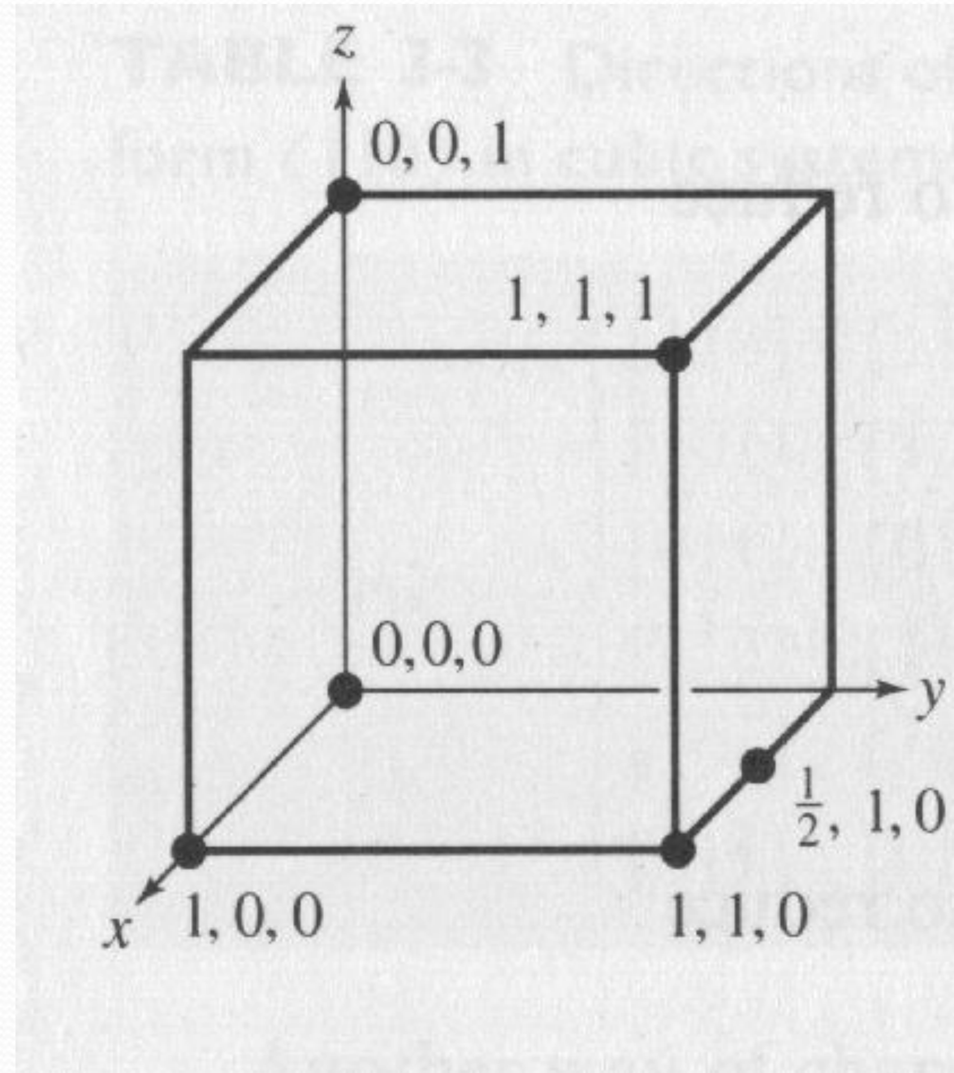
- El conocimiento de las direcciones y los planos dentro de la celda, es importante para la determinación del comportamiento mecánico de esta estructura cristalina a las cargas.

- La designación de direcciones y planos en la celda unitaria se hace a través de los índices de Miller, que a continuación se describe como obtenerlos.

PUNTOS, DIRECCIONES Y PLANOS EN LA CELDA UNITARIA

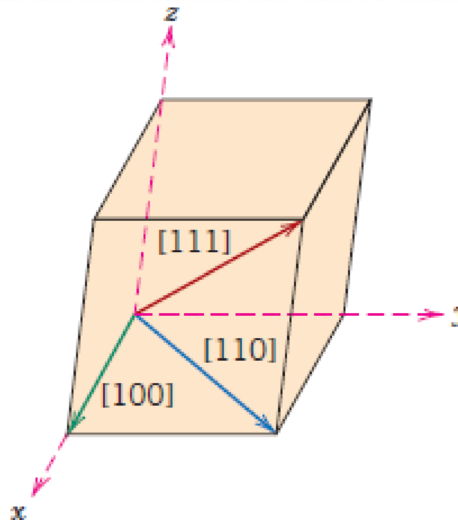
- Se utilizan tres números o índices

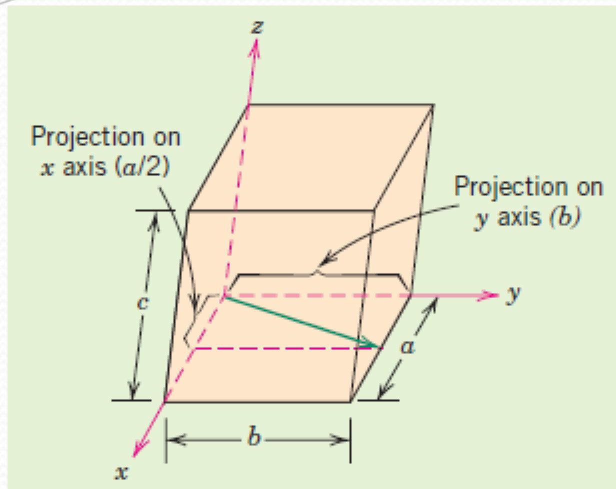
- Los puntos en las celdas se manejan igual que en matemáticas, por las tres coordenadas de su posición espacial respecto a un origen preestablecido.



Direcciones en la celda unitaria

- Usando un sistema coordenado de mano derecha, determine dos puntos sobre la dirección.
- Réstele a las coordenadas del extremo, las coordenadas del punto de inicio, para obtener el número de parámetros recorridos en cada eje.
- Elimine fracciones y reduzca al menor entero.
- Encierre entre paréntesis [ ] colocando los negativos sobre el número.





SISTEMA CUBICO

	x	y	z
Projections	$a/2$	b	$0c$
Projections (in terms of a, b, and c)	$\frac{1}{2}$	1	0
Reduction	1	2	0
Enclosure		[120]	

SISTEMA HEXAGONAL

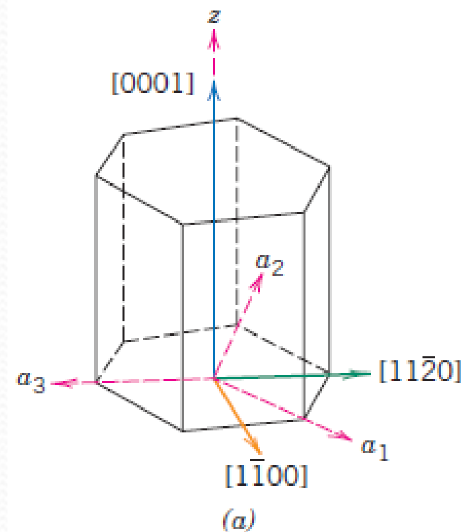
$$[u'v'w'] \longrightarrow [uvtw]$$

$$u = \frac{1}{3}(2u' - v')$$

$$v = \frac{1}{3}(2v' - u')$$

$$t = -(u + v)$$

$$w = w'$$



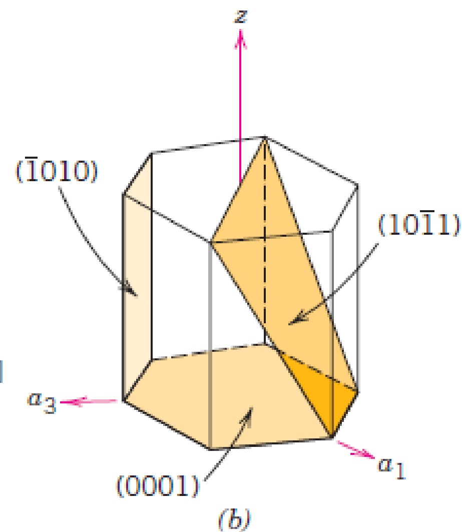
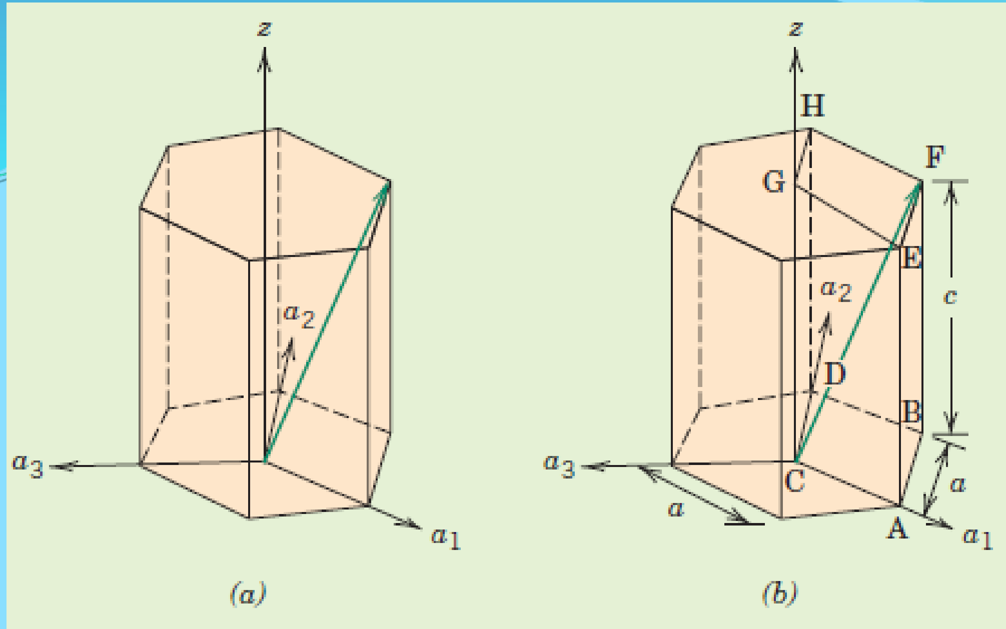


Figure 3.8 For the hexagonal crystal system, (*a*) [0001], [1$\bar{1}$00], and [11$\bar{2}$0] directions, and (*b*) the (0001), (10$\bar{1}$1), and ($\bar{1}$010) planes.



$$u' = 1 \qquad v' = 1 \qquad w' = 1$$

$$u = \frac{1}{3}(2u' - v') = \frac{1}{3}[(2)(1) - 1] = \frac{1}{3}$$

$$v = \frac{1}{3}(2v' - u') = \frac{1}{3}[(2)(1) - 1] = \frac{1}{3}$$

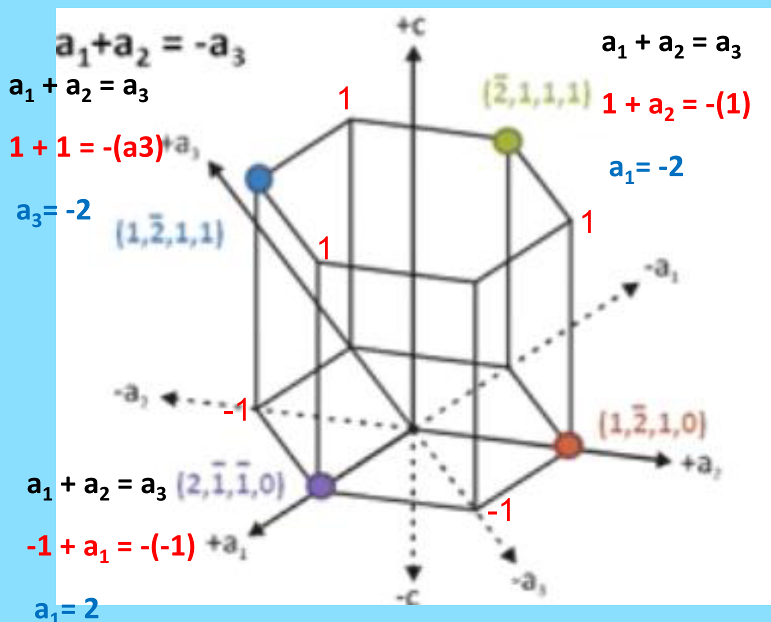
$$t = -(u + v) = -\left(\frac{1}{3} + \frac{1}{3}\right) = -\frac{2}{3}$$

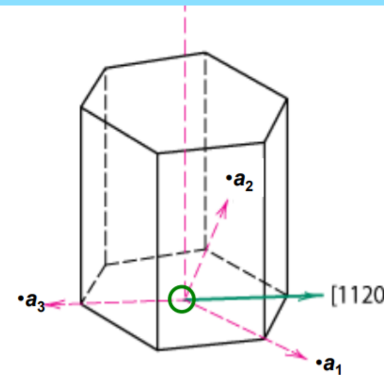
$$w = w' = 1$$

$$[11\bar{2}3]$$

Se utilizan 4 ejes (a_1, a_2, a_3, c)

El eje por donde esta el punto le ponemos 2

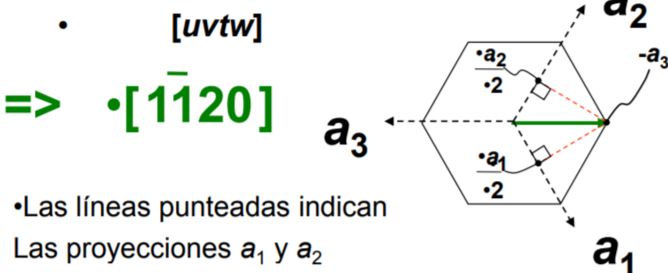




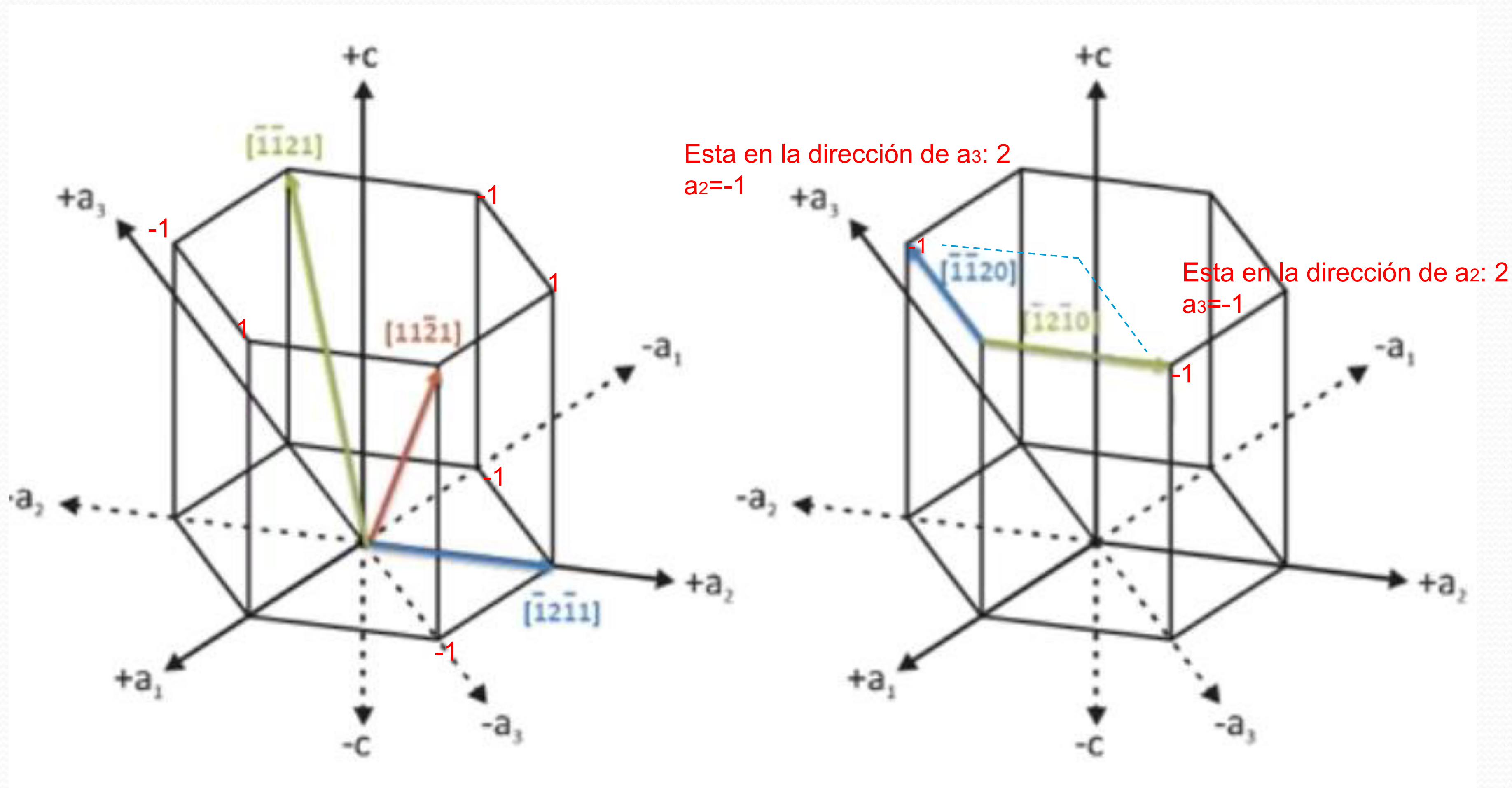
1. Posicionar el vector para que pase por el origen.
2. Obtener las proyecciones en términos de las dimensiones a_1, a_2, a_3, o c de la celda unitaria.
3. Ajustar para obtener los enteros más pequeños
4. Encerrarlos en corchetes sin comas

- ***[uvtw]***

•ej: ½, ½, -1, 0 => •$[1\bar{1}20]$



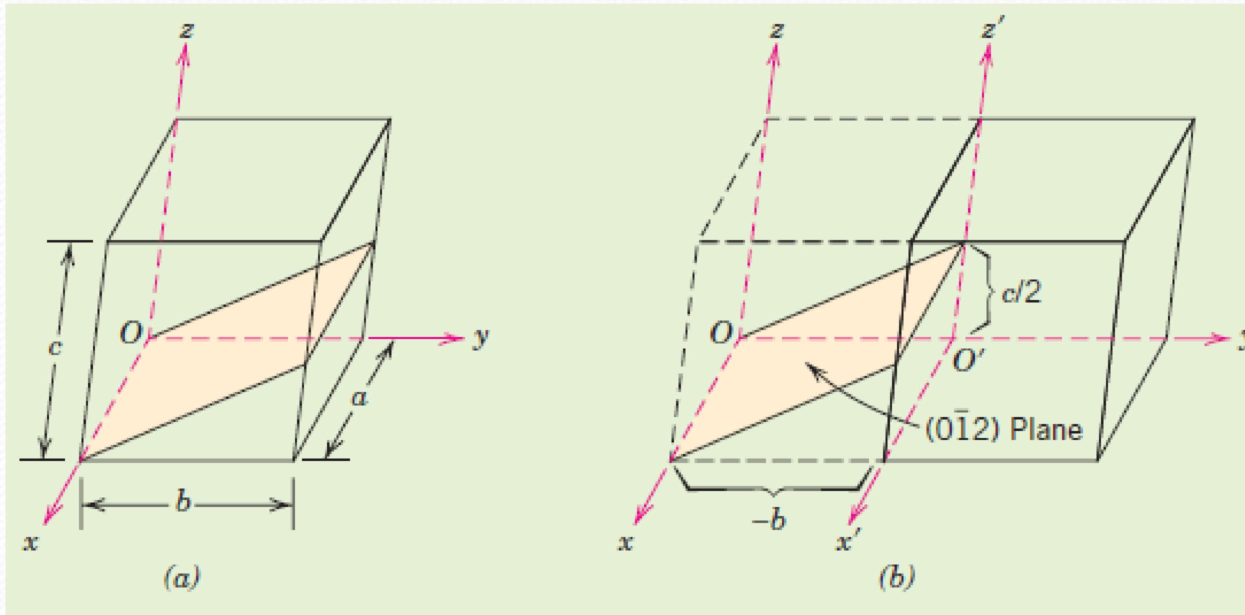
•Las líneas punteadas indican Las proyecciones a_1 y a_2



https://mail.google.com/mail/u/1/#sent/QgrcJHrttknbQzJDDHMrlNtFqdvzpWLnfKB?projector=1

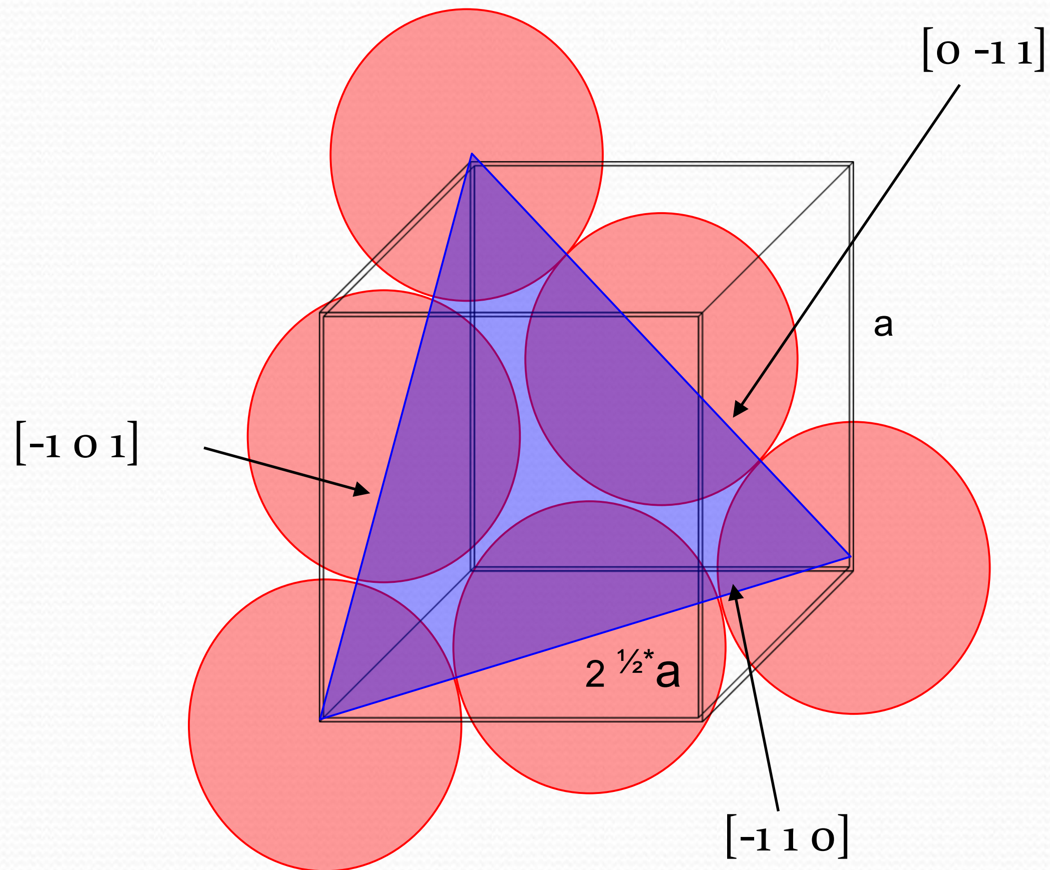
Planos en la celda unitaria

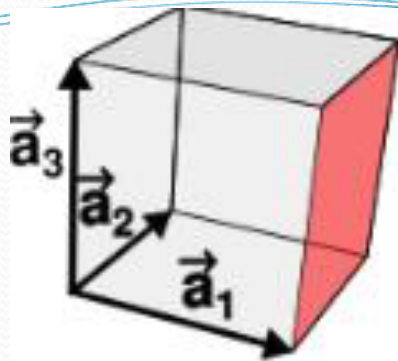
- Identifique los puntos *a*, *b* y *c*, en los cuales el plano interfecta los ejes coordenados *x*, *y* y *z* en términos del parámetro de red. (Si el plano pasa por el origen, el sistema coordenado deberá ser desplazado).
- Calcule los recíprocos de los interceptos.
- Elimine fracciones sin reducir al menor entero.
- Encierre entre paréntesis ( ) colocando los negativos sobre el número.

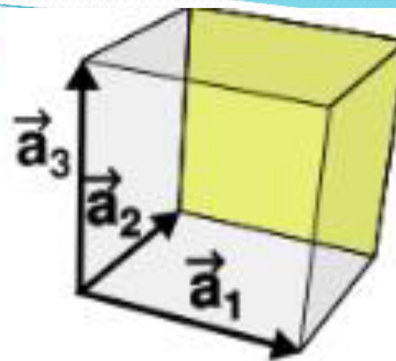


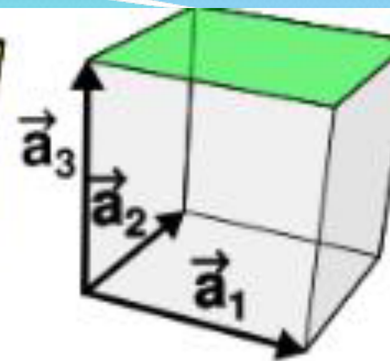
	x	y	z
Intercepts	∞a	$-b$	$c/2$
Intercepts (in terms of lattice parameters)	∞	-1	$\frac{1}{2}$
Reciprocals	0	-1	2
Reductions (unnecessary)			
Enclosure		$(0\bar{1}2)$	

Plano (1 1 1) en FCC:

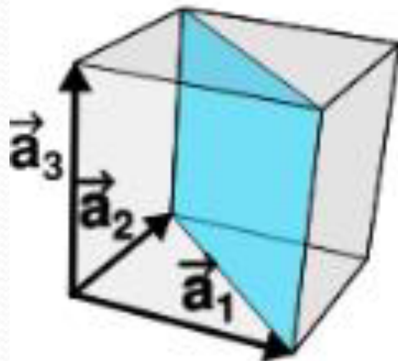


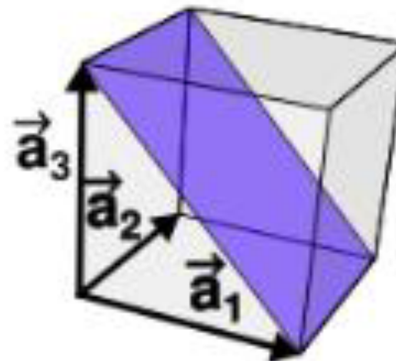


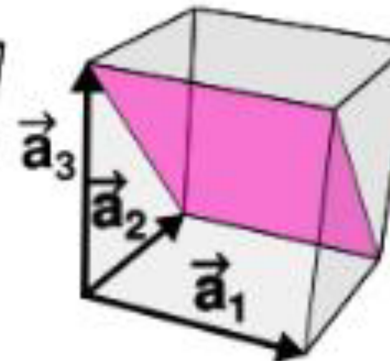




(100) (010) (001)

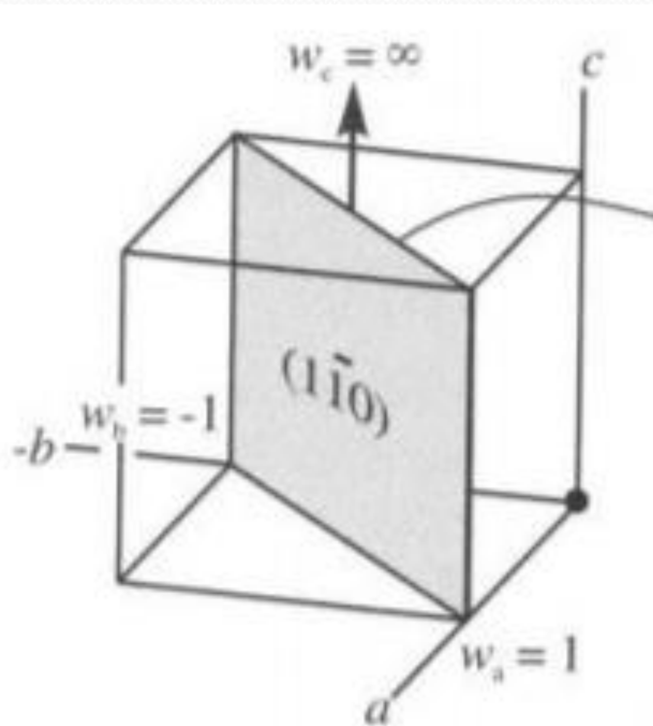


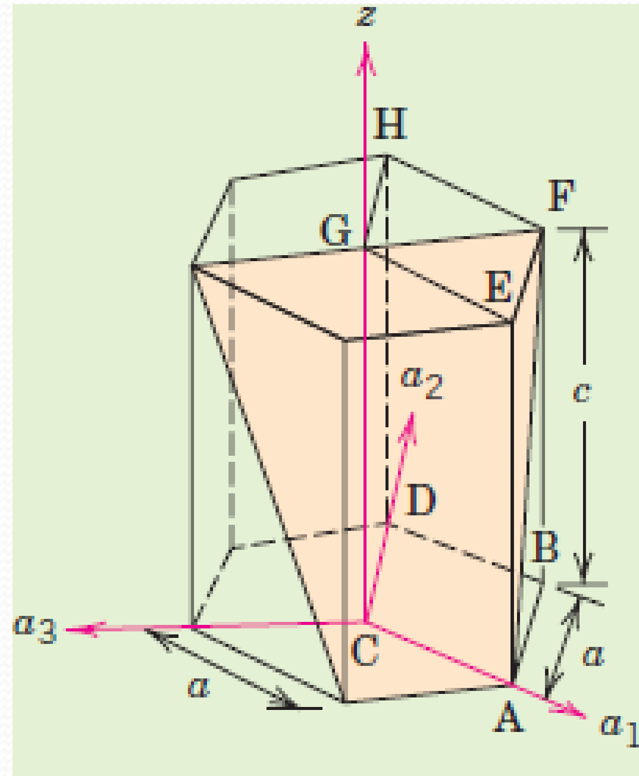




(110) (101) (011)

https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%8Dndice_de_Miller





$$h = 1$$
$$k = -1$$
$$l = 1$$

$$i = -(h + k)$$

$$i = -(h + k) = -(1 - 1) = 0$$

$(1\bar{1}01)$

file:///C:/Users/User/Downloads/IndicesDeMiller.pdf

DIRECCIONES Y PLANOS:

- En las celdas unitarias existen direcciones y planos semejantes llamados familias.
- Las direcciones semejantes o familia de direcciones se caracteriza al usar los índices de Miller entre paréntesis <>
- Los planos semejantes o familia de planos se caracteriza al usar los índices de Miller entre paréntesis { }.

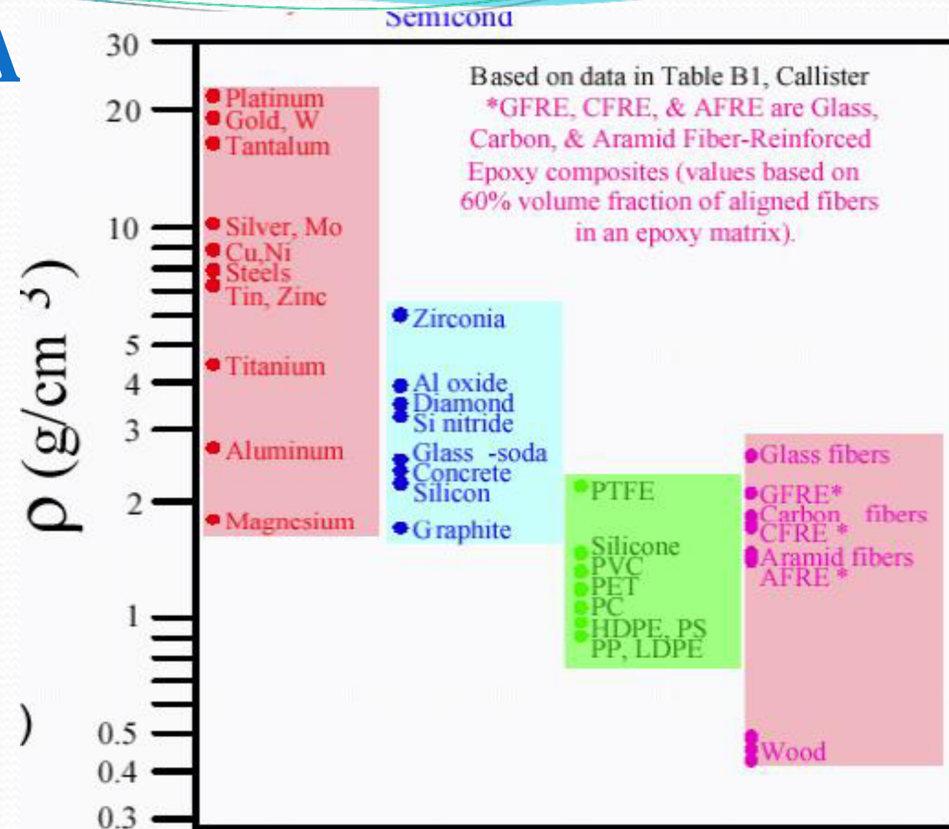
$$\langle 110 \rangle = \left\{ \begin{array}{ll} [110] & [\bar{1}\bar{1}0] \\ [101] & [\bar{1}0\bar{1}] \\ [011] & [0\bar{1}\bar{1}] \\ [1\bar{1}0] & [\bar{1}10] \\ [10\bar{1}] & [\bar{1}01] \\ [01\bar{1}] & [0\bar{1}1] \end{array} \right.$$

$$\{110\} \left\{ \begin{array}{l} (110) \\ (101) \\ (011) \\ (1\bar{1}0) \\ (10\bar{1}) \\ (01\bar{1}) \end{array} \right.$$

Nota: Los valores negativos de los planos no son planos únicos.

DENSIDAD TEORICA

$$\rho = \frac{nA}{V_C N_A}$$



n = number of atoms associated with each unit cell

A = atomic weight

V_C = volume of the unit cell

N_A = Avogadro's number (6.023×10^{23} atoms/mol)

Ejemplo, Densidad del Cu.

$$\rho = \frac{nA_{Cu}}{V_C N_A} = \frac{nA_{Cu}}{(16R^3\sqrt{2})N_A}$$

$$= \frac{(4 \text{ atoms/unit cell})(63.5 \text{ g/mol})}{[16\sqrt{2}(1.28 \times 10^{-8} \text{ cm})^3/\text{unit cell}](6.023 \times 10^{23} \text{ atoms/mol})}$$

$$= 8.89 \text{ g/cm}^3$$

DENSIDAD TEORICA DE CERÁMICOS

La densidad se calcula de manera similar que en los metales, pero con una Ecuación modificada:

$$\rho = \frac{n'(\sum A_C + \sum A_A)}{V_c N_A}$$

Donde

n' = es el número de unidades en la fórmula dentro de la celda unitaria (esto es El número de iones en la fórmula química.

Ej.: $BaTiO_3$ 1 ion de bario, 1 ion de titanio y 3 iones de oxígeno.

ΣAc = suma de pesos atómicos de todos los cationes en la fórmula

ΣA_A = suma de pesos atómicos de todos los aniones en la fórmula

V_C= volumen de la celda unitaria

N_A = número de Avogadro, 6.022 x10^{23} unidades por mol.

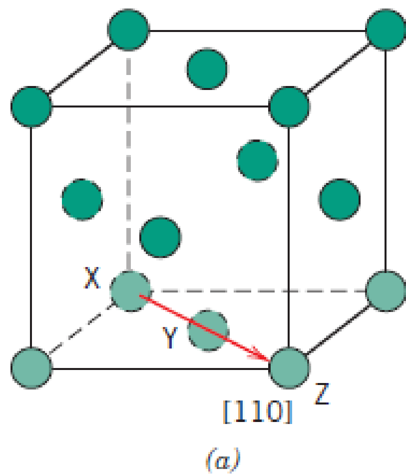
DENSIDAD LINEAL Y PLANAR

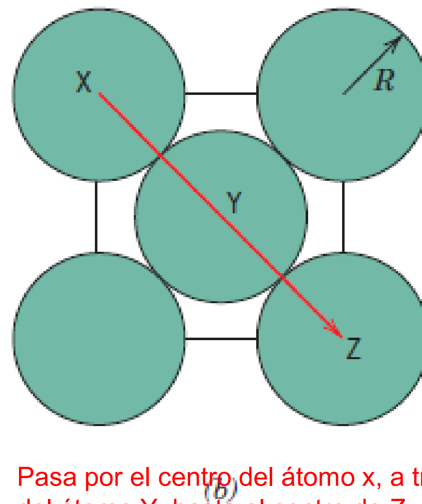
$$LD = \frac{\text{number of atoms centered on direction vector}}{\text{length of direction vector}}$$

Número de diámetros atómicos cortados por longitud seleccionada de la línea en la dirección de interés

$$PD = \frac{\text{number of atoms centered on a plane}}{\text{area of plane}}$$

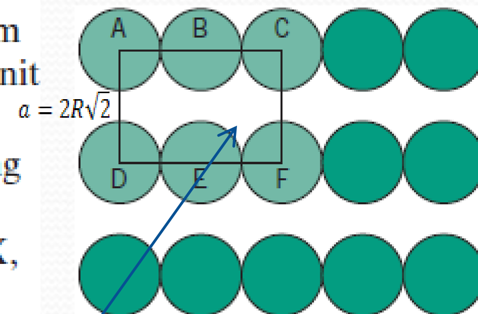
Número equivalente de átomos cortados por el área seleccionada





Pasa por el centro del átomo x, a través, del átomo Y, hasta el centro de Z

Figure 3.12 (*a*) Reduced-sphere FCC unit cell with the [110] direction indicated. (*b*) The bottom face-plane of the FCC unit cell in (*a*) on which is shown the atomic spacing in the [110] direction, through atoms labeled X, Y, and Z.



$$(4R)(2R\sqrt{2}) = 8R^2\sqrt{2}$$

$$LD_{110} = \frac{2 \text{ atoms}}{4R} = \frac{1}{2R}$$

$$PD_{110} = \frac{2 \text{ atoms}}{8R^2\sqrt{2}} = \frac{1}{4R^2\sqrt{2}}$$

Primer Taller, parte b

1. El radio atómico del níquel es 1.243 A. Calcule el parámetro de red y su densidad teorica. La masa atómica del Ni es 58.71 g/mol.

2. Densidad planar del plano (110) de la estructura BCC

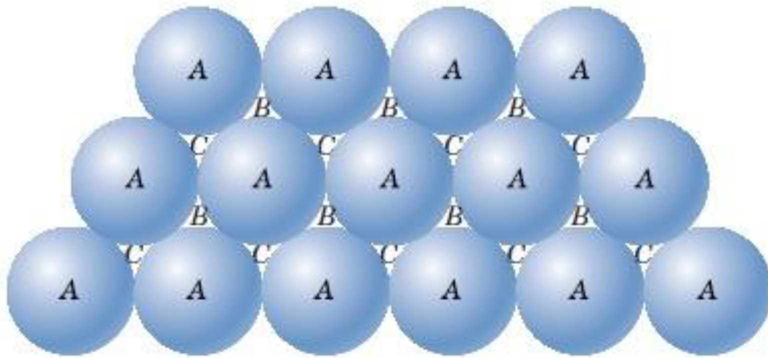
3. Dibuje las direcciones (100), (110), (111) y sus negativos. Dibuje los planos (100), (110), (111), (200), (220),(222) y sus negativos

4. Determine el Factor de empaquetamiento de la estructura BCC

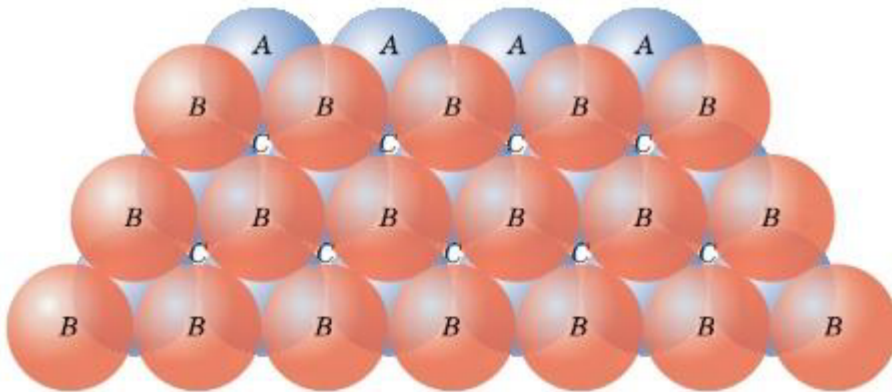
5. Realizar los siguientes ejercicios del libro Ciencia e Ingeniería de los Materiales, cuarta edición, Donald Askeland: 3.59, 3.60, 3.61 y 3.105.

6. Realizar los siguientes ejercicios del libro de Ciencia e Ingeniería de Materiales, 3 edición, Williams F. Smith: 3.52, 3.53, 3.73, 376, 3.88 (ver ejercicio resuelto 3.16), 3.89, 390 y 3.91.

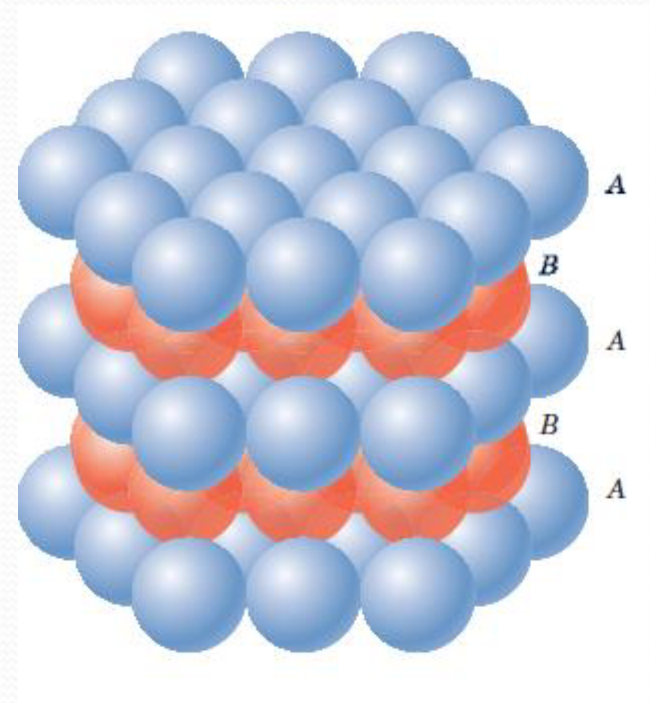
FORMAS DE APILAMIENTO



(a)



(b)



FORMAS DE APILAMIENTO

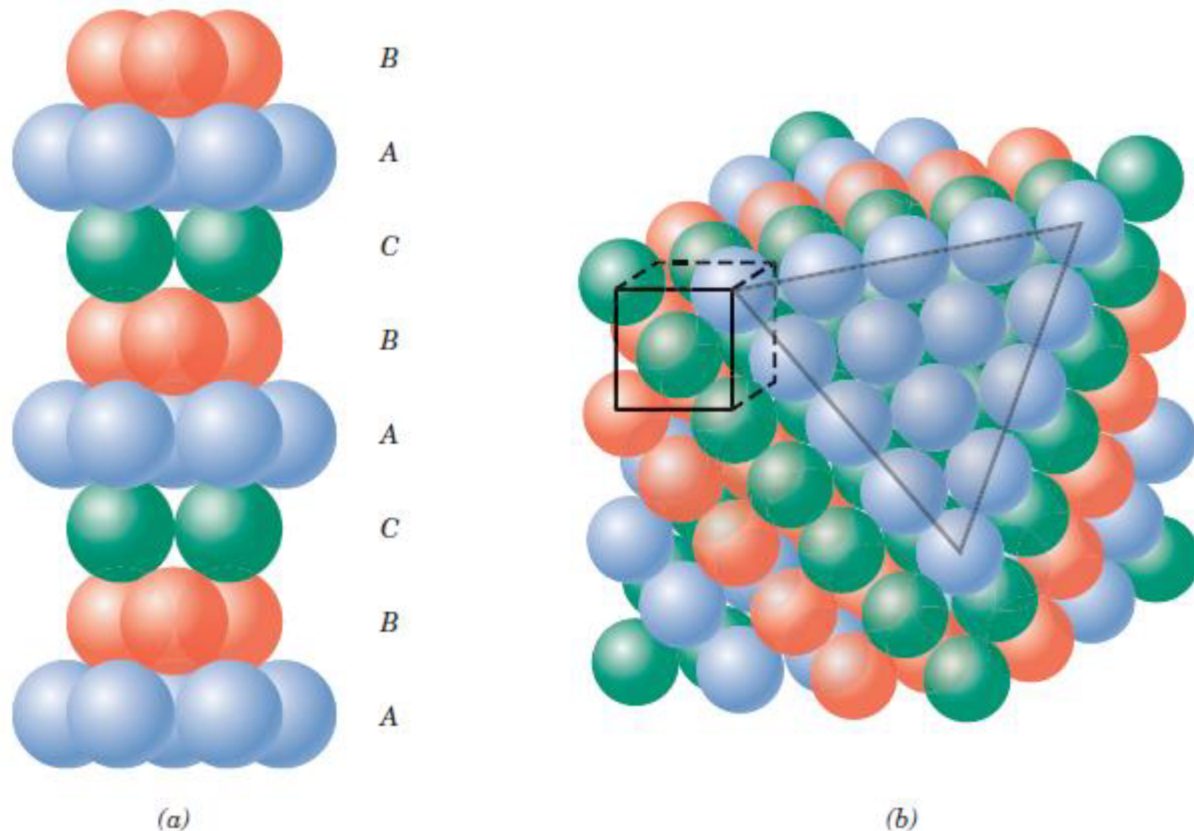
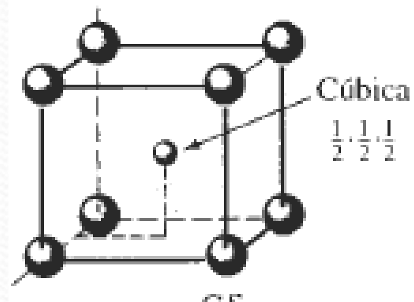
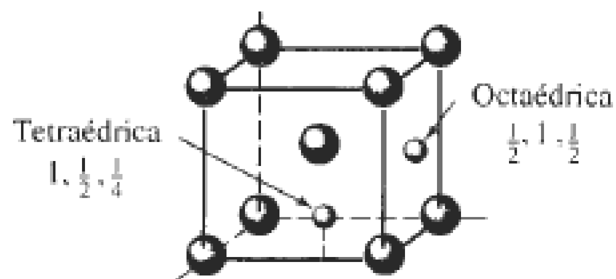
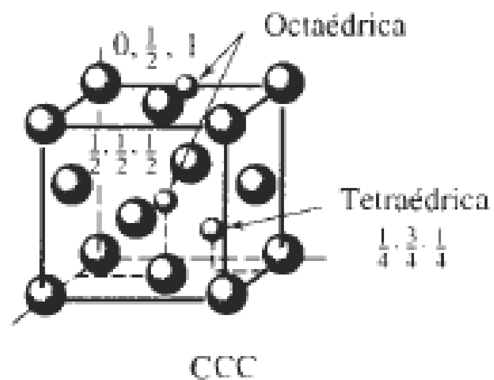


Figure 3.15 (*a*) Close-packed stacking sequence for face-centered cubic. (*b*) A corner has been removed to show the relation between the stacking of close-packed planes of atoms and the FCC crystal structure; the heavy triangle outlines a (111) plane. [Figure (*b*) from W. G. Moffatt, G. W. Pearsall, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. I, *Structure*, p. 51. Copyright © 1964 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.]

SITIOS INTERSTICIALES







Coordination number	Location of ions about central ion	Range of ratio cation radius to anion radius
8	Corners of cube	≥0.732
6	Corners of octahedron	≥0.414
4	Corners of tetrahedron	≥0.225
3	Corners of triangle	≥0.156
2	Linear	≥0

Para recordar: Las posiciones intersticiales son octaédricos y tetraédricos.
En el sitio octaédrico hay seis iones próximos equidistantes desde el centro del hueco. Hay tres átomos o iones en cada plano. Generalmente se localizan en el centro de la celda unitaria y en los centros de las aristas del cubo.
En el sitio tetraédrico hay cuatro iones más cercanos equidistantes desde el centro. Hay tres átomos o iones en un plano y uno individual en el plano adyacente. Se localizan en las posiciones (¼, ¼, ¼).

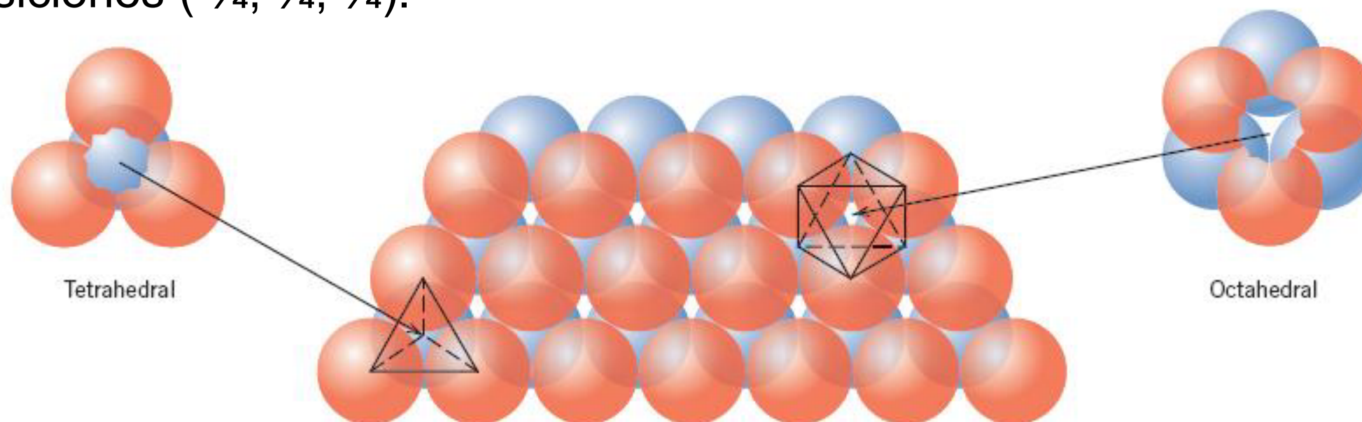


Figure 12.7 The stacking of one plane of close-packed (orange) spheres (anions) on top of another (blue spheres); the geometries of tetrahedral and octahedral positions between the planes are noted. (From W. G. Moffatt, G. W. Pearsall, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials,* Vol. I, *Structure.* Copyright © 1964 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)

Estas estructuras cristalinas son compactas y se asemejan a la estructura FCC y BCC de los metales.

ESTRUCTURA TIPO AX

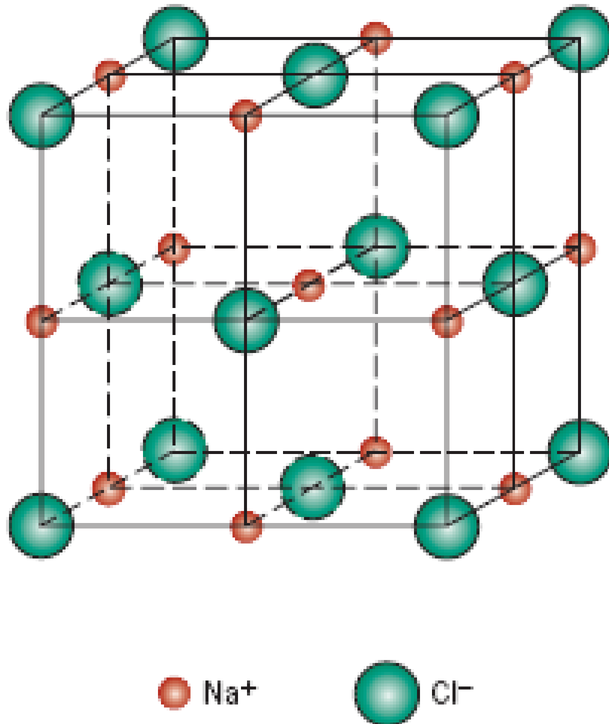


Figure 12.2 A unit cell for the rock salt, or sodium chloride (NaCl), crystal structure.

El catión esta cargado positivamente y es mas pequeño por que cede electrones, generalmente son metales. Los aniones son nos metales y están cargados negativamente.

Cationes = Aniones
Número de coordinación : 6
Dos celdas FCC, una compuesta por aniones
y otra por cationes
MgO, MnS, LiF, FeO, TiN, NbN, CrN, otros

ESTRUCTURA TIPO AX

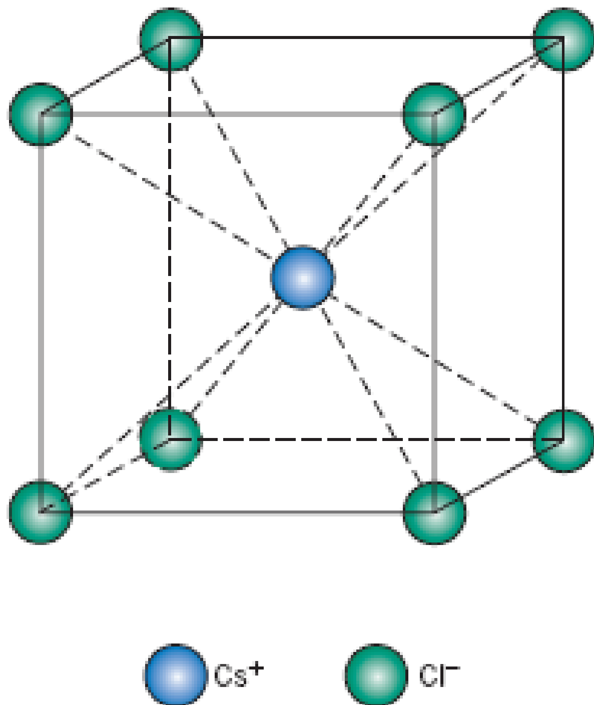


Figure 12.3 A unit cell for the cesium chloride (CsCl) crystal structure.

Número de coordinación: 8
Los aniones están en los vértices del cubo
El catión en el centro del cubo
No es una estructura BCC porque intervienen dos iones diferentes

ESTRUCTURA TIPO AX

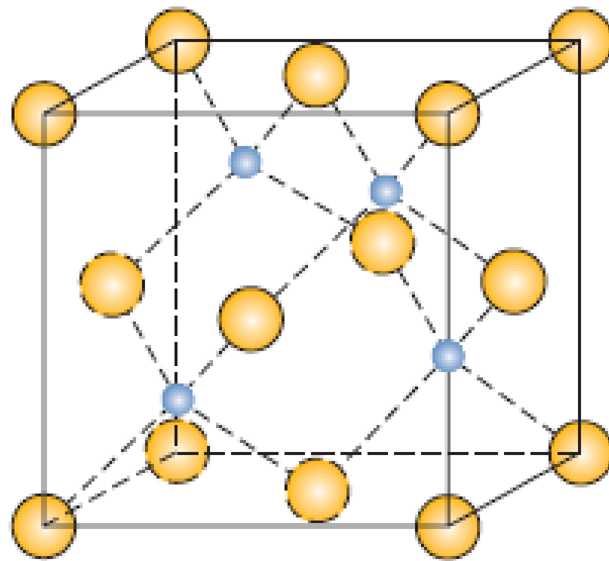
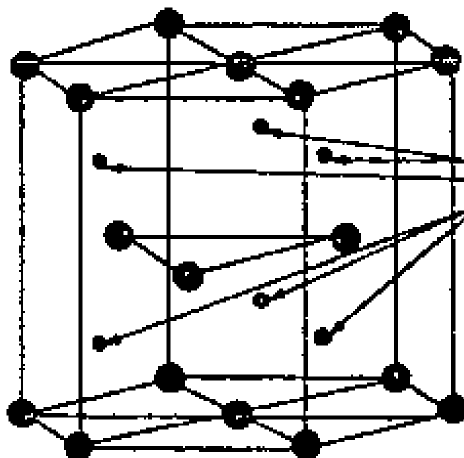


Figure 12.4 A unit cell for the zinc blende (ZnS) crystal structure.

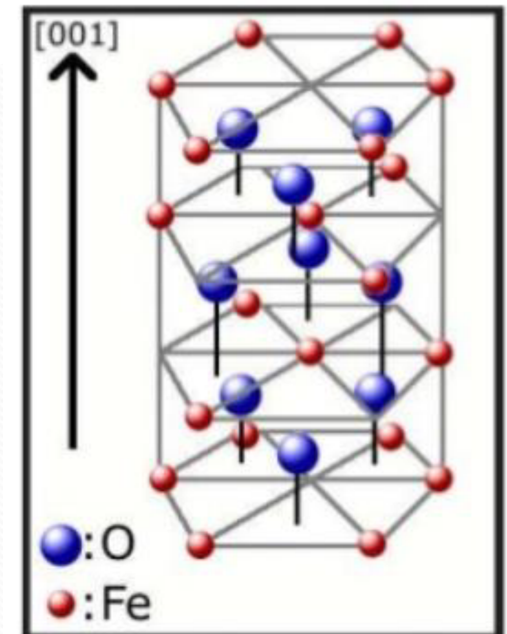


Los átomos de Zn llenan 4 posiciones tetraédricas en el interior.
Número de coordinación: 4
ZnTe, SiC, otros.



Sitios octaédricos
Dos tercios ocupados por Al^{3-}

Estructura cristalina del corindón Al_2O_3.
Los iones de O^{2-} ocupan las posiciones de la celda unidad hexagonal compacta .
Los iones de aluminio Al^{3+} ocupan 2/3 de las posiciones intersticiales octaédricas.



ESTRUCTURA TIPO A_mX_p

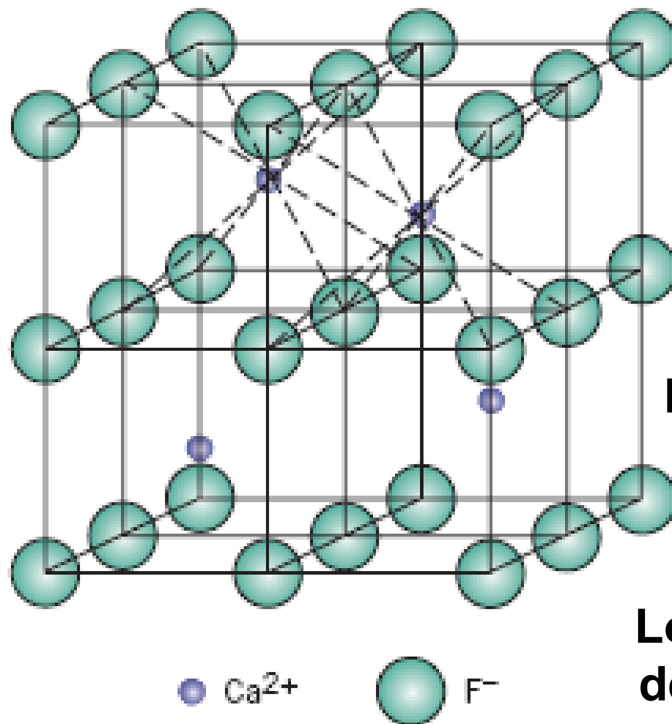


Figure 12.5 A unit cell for the fluorite (CaF_2) crystal structure.

Las cargas de los cationes y los aniones no son iguales.
Número de coordinación: 8

Los iones F^- se localizan en los vértices. Los iones de Ca están en los centros de los cubos, solo esta la mitad de sus átomos. HAY 4 BCC.
ZrO_2 cubica, UO_2, ThO_2, otros.

ESTRUCTURA TIPO $A_mB_nX_p$

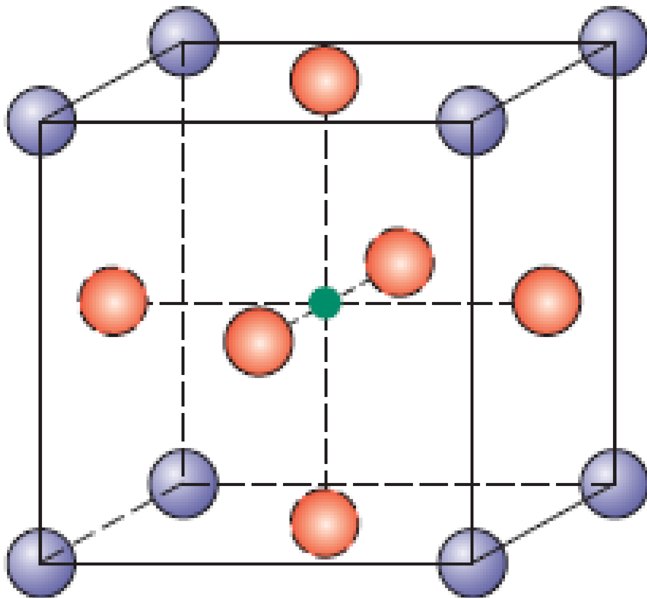
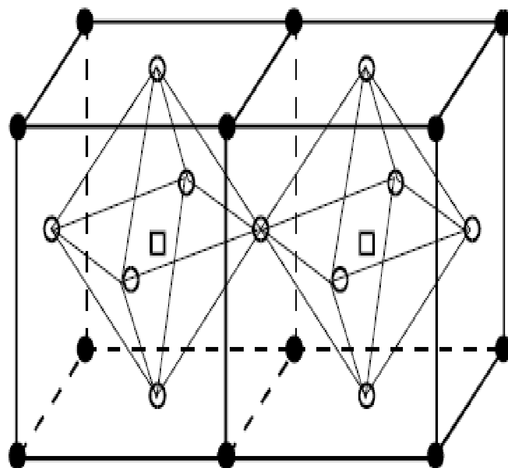
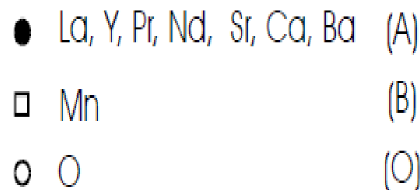


Figure 12.6 A unit cell for the perovskite crystal structure.

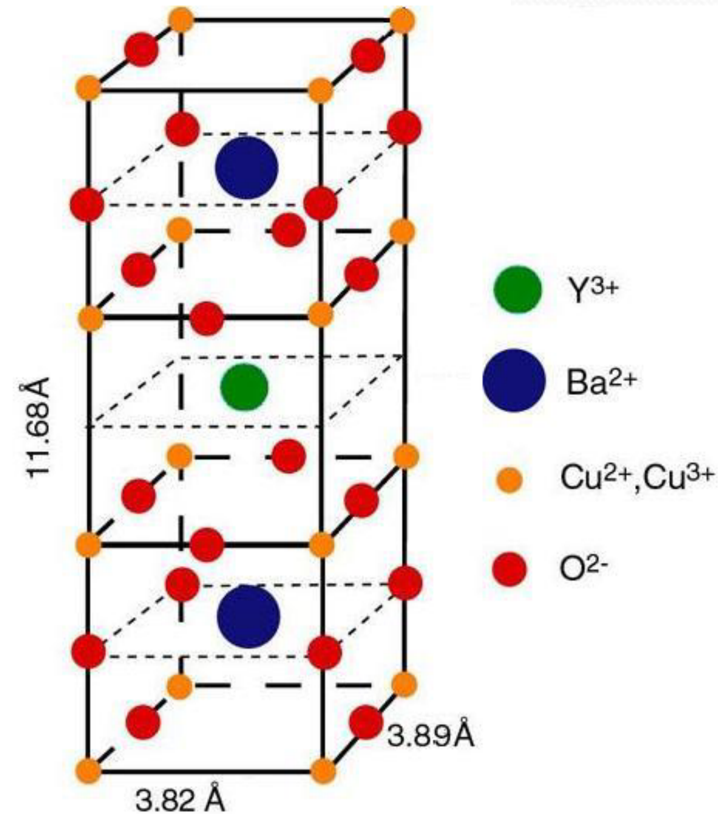


Hay dos cationes: Ba y Ti.
$BaTiO_3$, otros, $SrZrO_3$, $SrSnO_3$



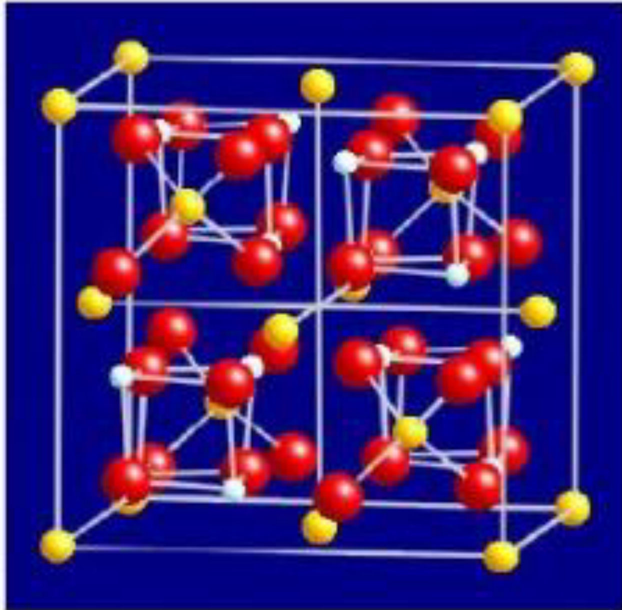


planos de CuO_2



ESTRUCTURA TIPO $A_mB_nX_p$

O^{2-}: empaquetamiento FCC
Al^{3+} y Mg^{2+}: En posiciones octaédricas y tetraédricas
Cerámicas que adoptan este tipo estructural: **Magnetita $FeO{\cdot}Fe_2O_3$**



Base (14 iones):

2 Mg^{2+}
4 Al^{3+}
8 O^{2-}

56 iones por celdilla

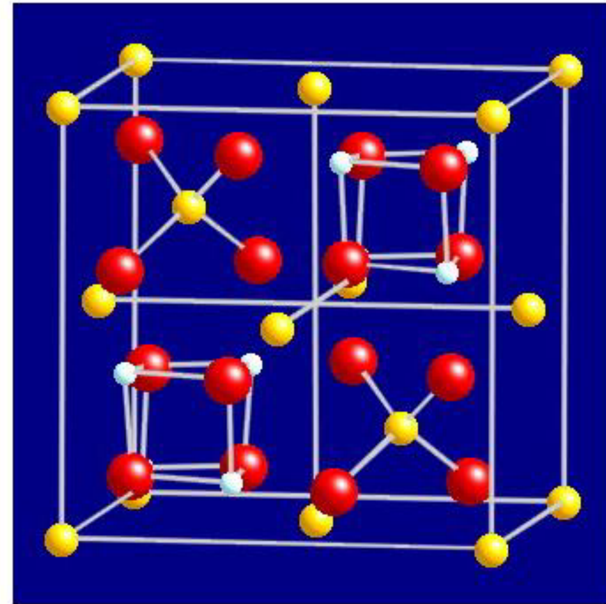
Otras espinelas son el $NiAl_2O_4$, $ZnAl_2O_4$ y $ZnFe_2O_4$

La celda tiene iones A(II) en una disposición cúbica centrada en las caras (en los vértices y en los centros de las caras). Dentro de ese cubo se encuentran ocho cubos mas pequeños; cuatro de ellos constan de tetraedros AO_4 y los otros cuatro cubos tienen iones B(III) y O(-II) en los vértices, formando unidades B_4O_4.

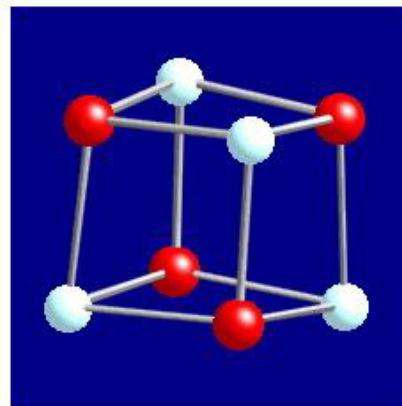
Ejemplo $MgAl_20_4$: Mg, amarillo; Al, blanco; O, rojo.

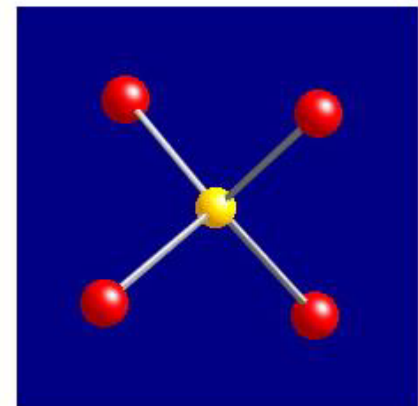
La estructura de la espinela se puede describir como un empaquetamiento cúbico compacto de oxígenos con los iones de Mg ocupando 1/8 de las posiciones tetraédricas y los iones Al en ½ las posiciones octaédricas.

Las unidades AO_4 y B_4O_4 se distribuyen en la celda de manera simétrica. En la siguiente figura, para mayor claridad, se han representado solo la mitad de los cubos

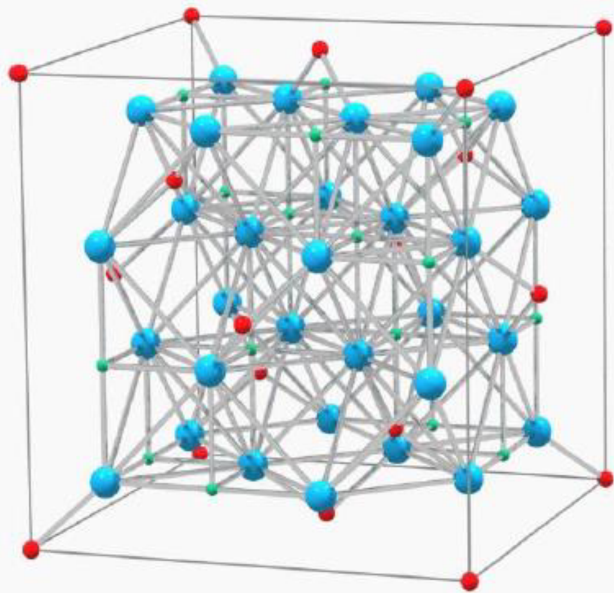


A continuación se muestran las unidades B_4O_4 y AO_4.

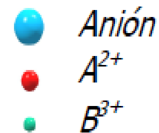


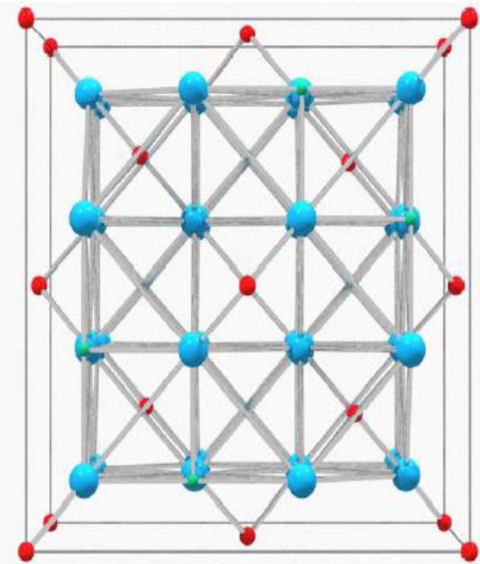


ESTRUCTURA TIPO $A_mB_nX_p$



ESPINELA





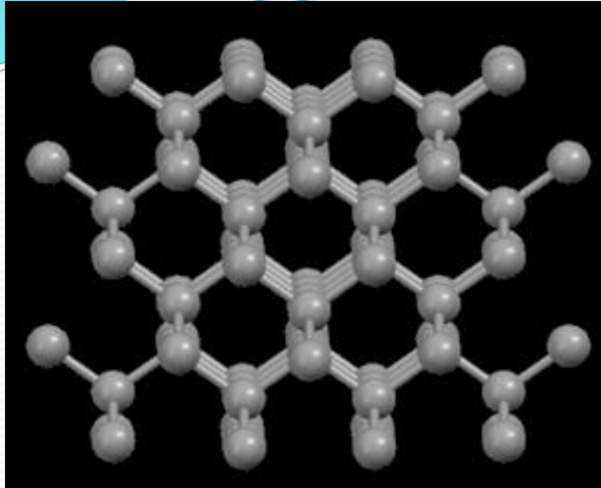
Plano (100)

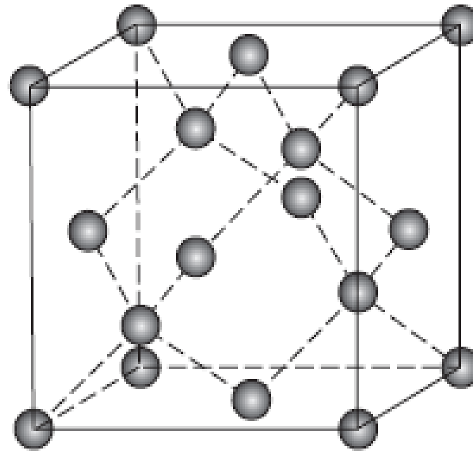
Anión: O^{2-}, S^{2-}, Se^{2-}, Te^{2-}
A^{2+}: Mg, Ca, Sr, Ba, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Hg ó Sn
B^{3+}:Al, Ga, In, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni ó Rh

Ejemplo $MgAl_2O_4$: Los iones de O^{2-} forman una red FCC, los iones de Mg^{2+} llenan los sitios tetraédricos y los Al^{3+} están en los sitios octaédricos. Existen también la espinela inversa, donde la mitad de los cationes B ocupan las posiciones tetraédricas y la otra mitad en las posiciones octaédricas y los cationes A ocupan únicamente posiciones octaédricas.

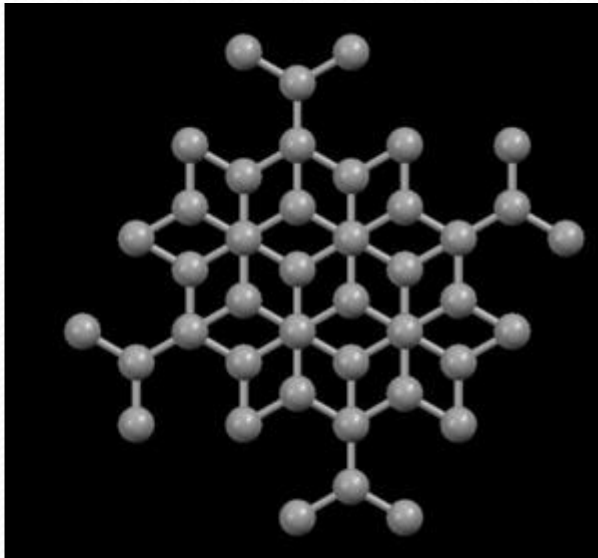
Las cationes tienes coordinación tetraédrica y octaédrica
96 huecos: 24 son cationes
64 huecos tetraédricos: 8 ocupados por cationes

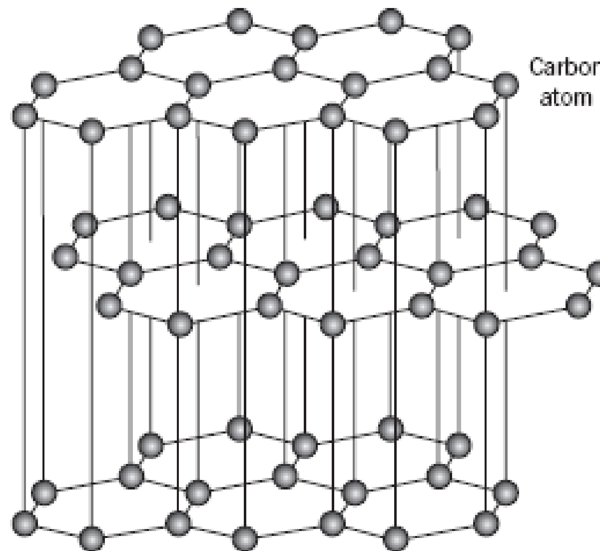
CARBONO





La estructura del diamante es muy similar a la blenda. Cada átomo de carbono se enlaza de forma covalente con otros 4 átomos de carbono.



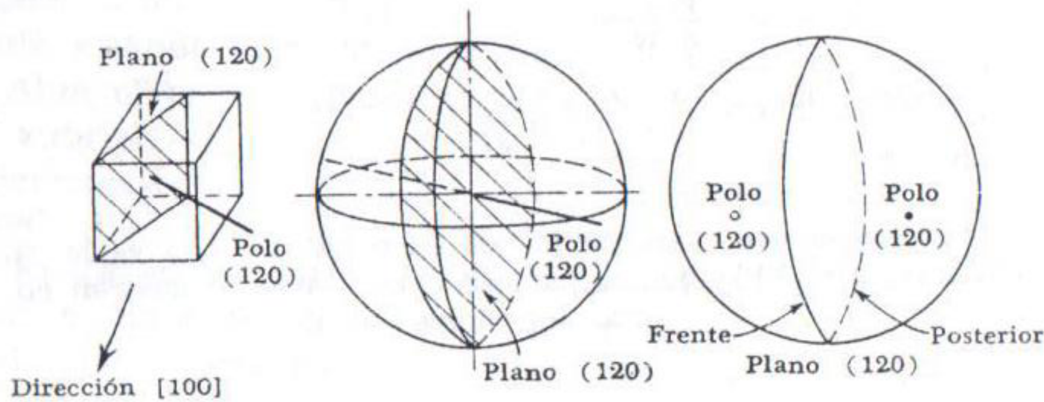


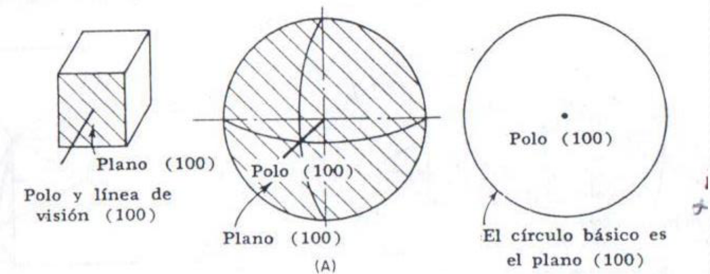
Los átomos de carbono tienen una disposición hexagonal. En los planos, cada átomo comparte tres electrones con sus vecinos con enlaces covalentes y el otro electrón participa con un enlace de Van der Waals con el siguiente plano.

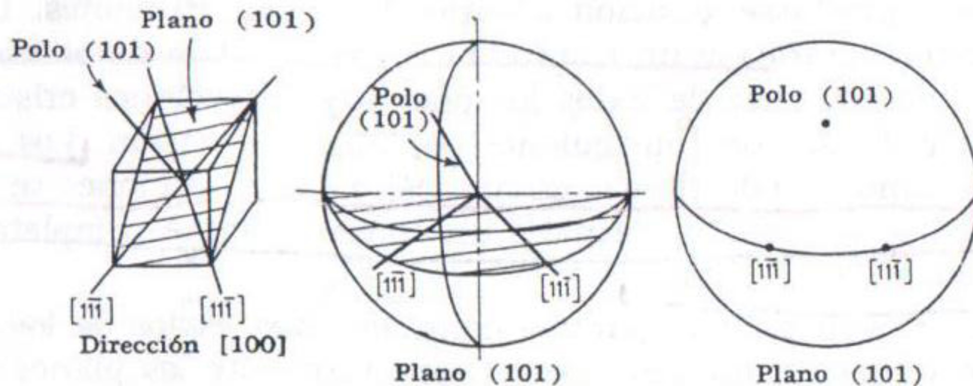
Proyección estereográfica

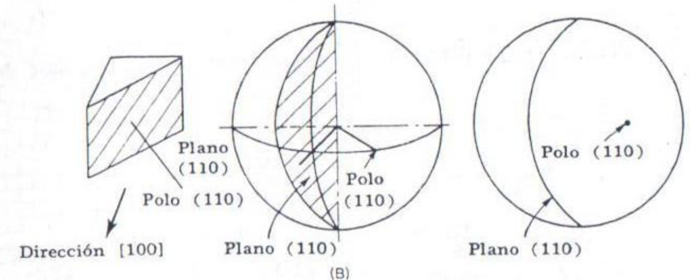
Es una representación gráfica de los cristales, en la que se conservan las relaciones angulares entre planos. Las normales a los planos del cristal, intersectan la superficie de la esfera en un conjunto de puntos llamados polos. El conjunto de polos forma sobre la esfera una figura de polos que representa la orientación de dichos planos.

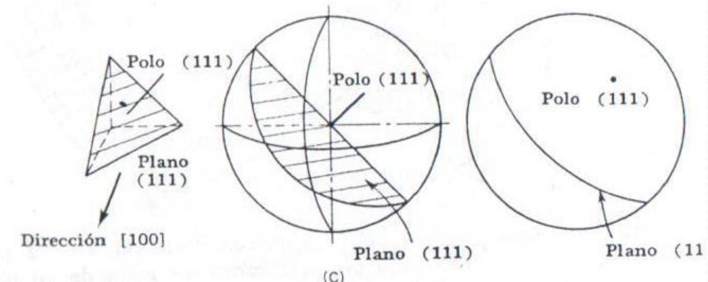
El plano es un circulo en la esfera, que en algunos casos en el frente se observa como una línea curva. Las direcciones son puntos.











http://crista.pangea.org/castella/proj-estereo/proj-sim-cub_es.htm

DIFRACCIÓN DE RAYOS X

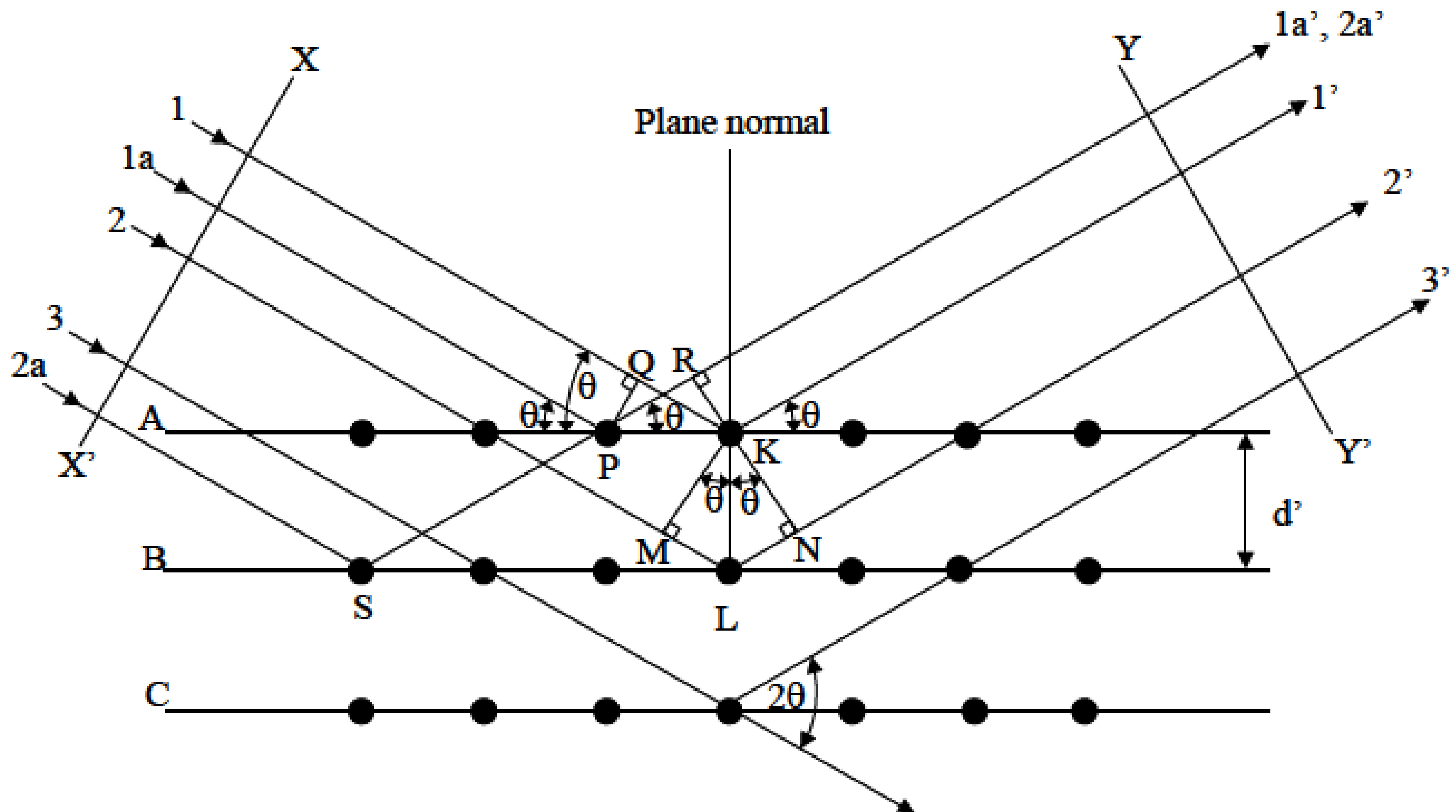
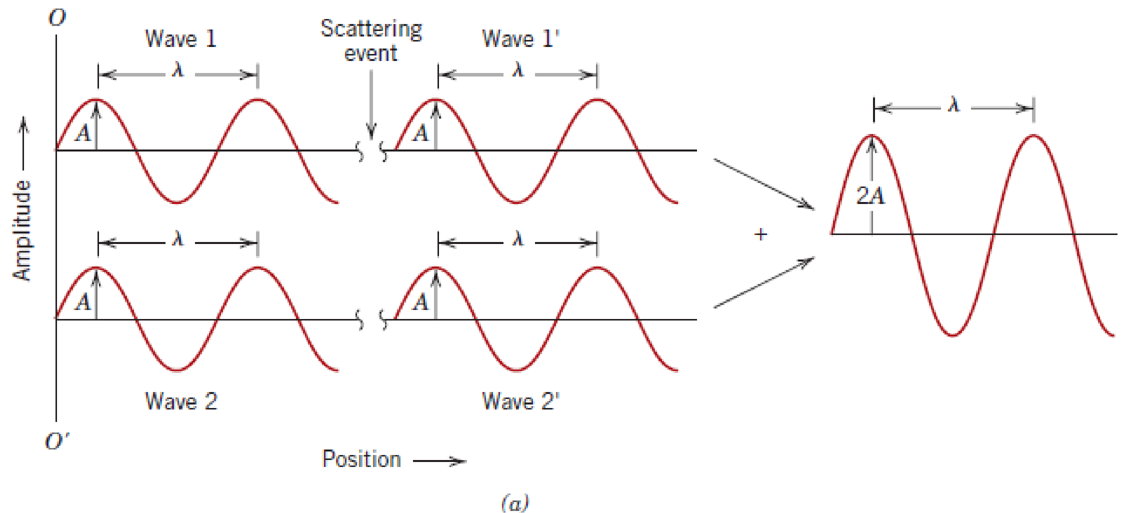
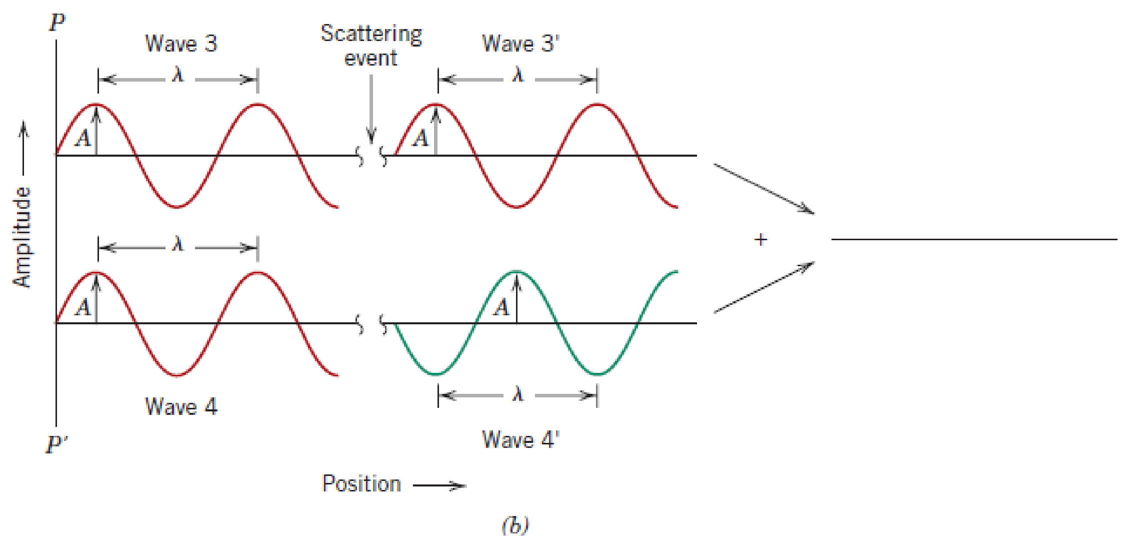


Figure 5.1 Diffraction of X-rays by a crystal lattice.

DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Figure 3.18
(*a*) Demonstration of how two waves (labeled 1 and 2) that have the same wavelength λ and remain in phase after a scattering event (waves 1′ and 2′) constructively interfere with one another. The amplitudes of the scattered waves add together in the resultant wave. (*b*) Demonstration of how two waves (labeled 3 and 4) that have the same wavelength and become out of phase after a scattering event (waves 3′ and 4′) destructively interfere with one another. The amplitudes of the two scattered waves cancel one another.





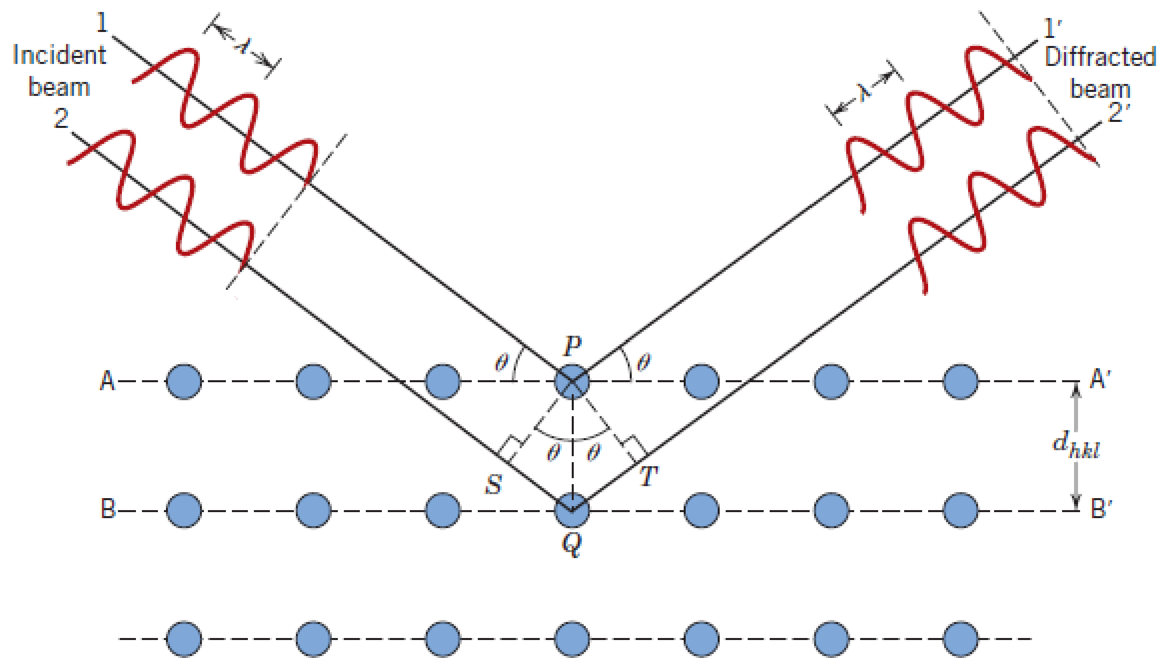


Figure 3.19
Diffraction of x-rays by planes of atoms (A–A′ and B–B′).

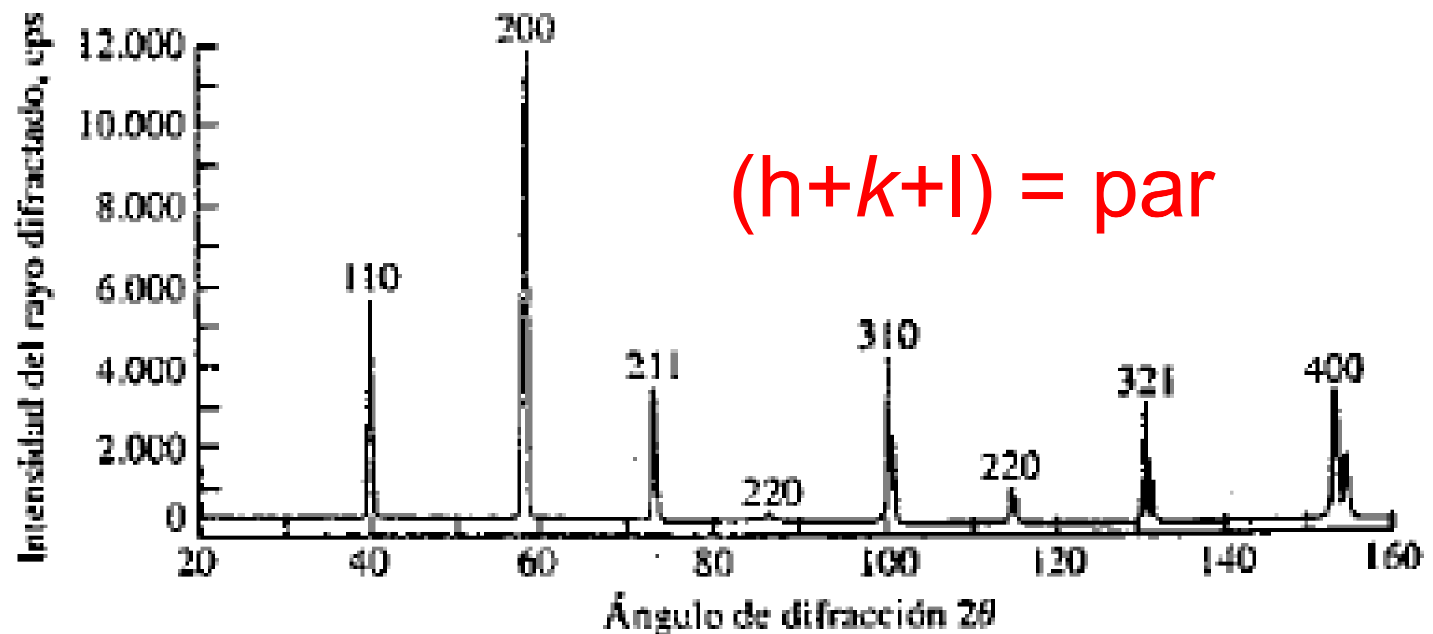
$$n\lambda = \overline{SQ} + \overline{QT}$$

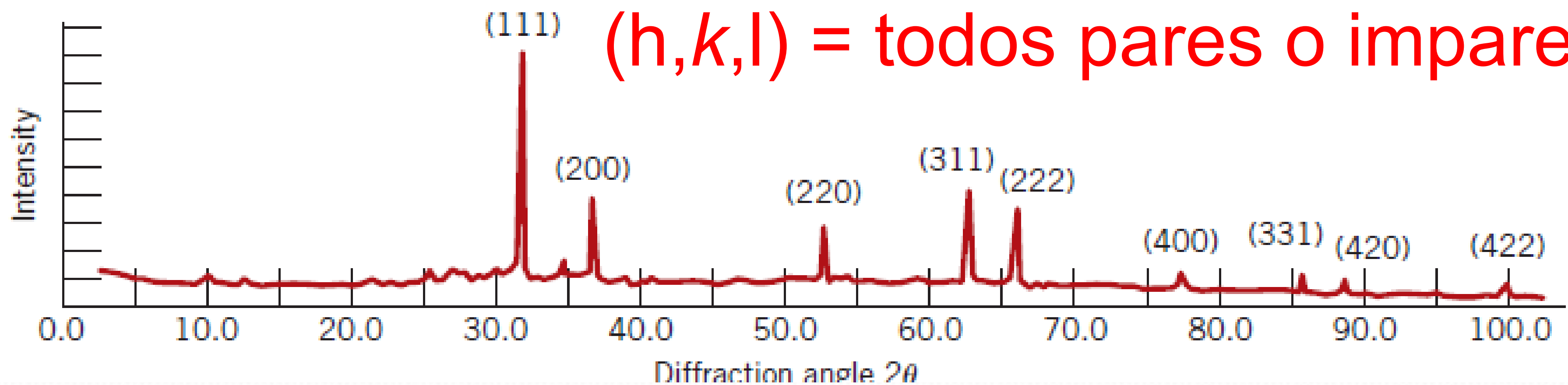
$$n\lambda = d_{hkl} \sin\theta + d_{hkl} \sin\theta$$

$$= 2d_{hkl} \sin\theta$$

Sistema cristalino	*Expresión para d_{hkl}*
Cúbico	$1/d^2 = (h^2 + k^2 + l^2)/a^2$
Tetragonal	$1/d^2 = (h^2 + k^2)/a^2 + l^2/c^2$
Ortorrómbico	$1/d^2 = h^2/a^2 + k^2/b^2 + l^2/c^2$
Hexagonal	$1/d^2 = 4(h^2 + hk + k^2)/3a^2 + l^2/c^2$
Monoclínico	$1/d^2 = (1/sen^2\beta)(h^2/a^2 + k^2sen^2\beta/b^2 + l^2/c^2 - 2hlcos\beta/ac)$
Triclínico	**Expresión compleja**

Planos cúbicos {hkl}	$h^2 + k^2 + l^2$	Suma $\Sigma(h^2 + k^2 + l^2)$	Planos cúbicos difractantes {hkl} FCC	BCC
{100}	$1^2 + 0^2 + 0^2$	1		
{110}	$1^2 + 1^2 + 0^2$	2	...	110
{111}	$1^2 + 1^2 + 1^2$	3	111	
{200}	$2^2 + 0^2 + 0^2$	4	200	200
{210}	$2^2 + 1^2 + 0^2$	5		
{211}	$2^2 + 1^2 + 1^2$	6	...	211
...		7		
{220}	$2^2 + 2^2 + 0^2$	8	220	220
{221}	$2^2 + 2^2 + 1^2$	9		
{310}	$3^2 + 1^2 + 0^2$	10	...	310





EJEMPLO

For BCC iron, compute (a) the interplanar spacing, and (b) the diffraction angle for the (220) set of planes. The lattice parameter for Fe is 0.2866 nm. Also, assume that monochromatic radiation having a wavelength of 0.1790 nm is used, and the order of reflection is 1.

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} = \frac{0.2866 \text{ nm}}{\sqrt{(2)^2 + (2)^2 + (0)^2}} = 0.1013 \text{ nm}$$

$$\sin\theta = \frac{n\lambda}{2d_{hkl}} = \frac{(1)(0.1790 \text{ nm})}{(2)(0.1013 \text{ nm})} = 0.884$$

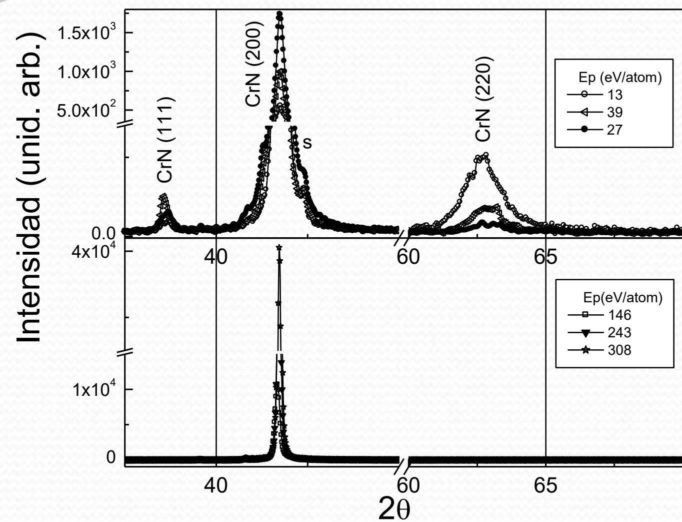
$$\theta = \sin^{-1}(0.884) = 62.13°$$

$$2\theta = (2)(62.13°) = 124.26°$$

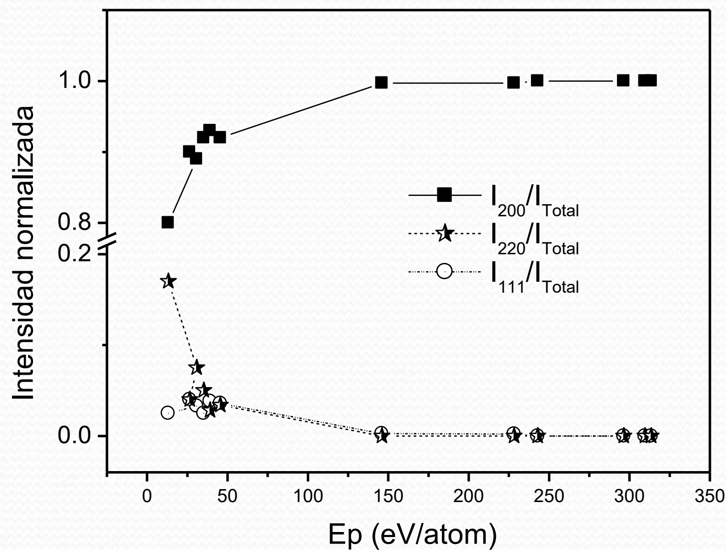
Orientación $$f = \frac{I_{200}}{I_{total}}$$

Tamaño de grano $$tg = \frac{0.9\lambda}{B\cos\theta}57.3$$

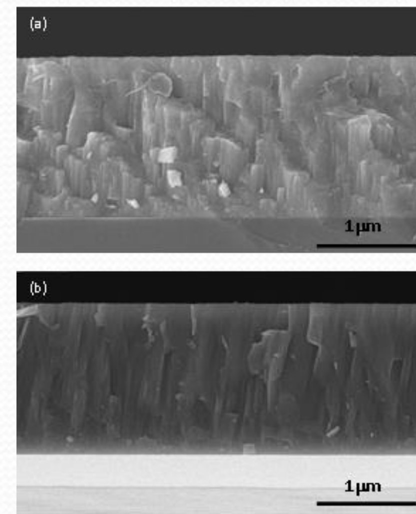
Deformación de la red $$\frac{d - d_o}{d_o}$$



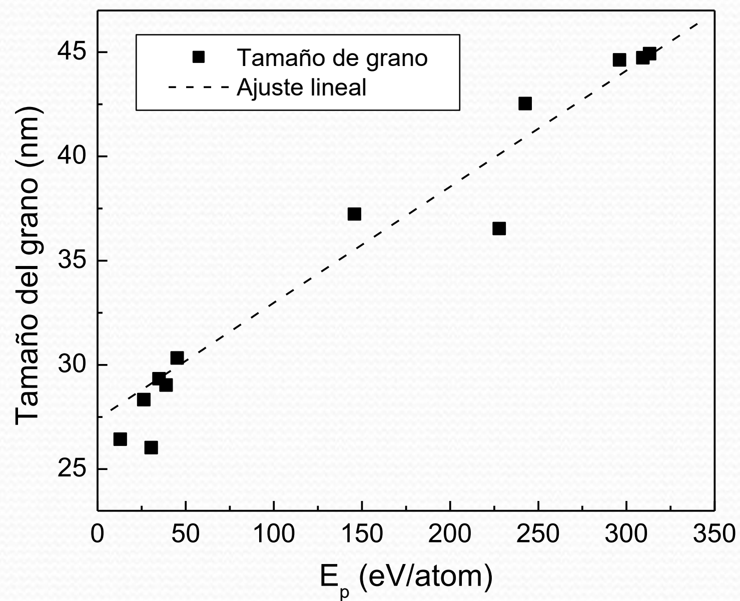
Intensidad (unid. arb.)
CrN (111)
CrN (200)
CrN (220)
S
Ep (eV/atom)
13
39
27
Ep(eV/atom)
146
243
308
1.5x10^3
1.0x10^3
5.0x10^2
0.0
4x10^4
1x10^4
0
40
60
65
2θ



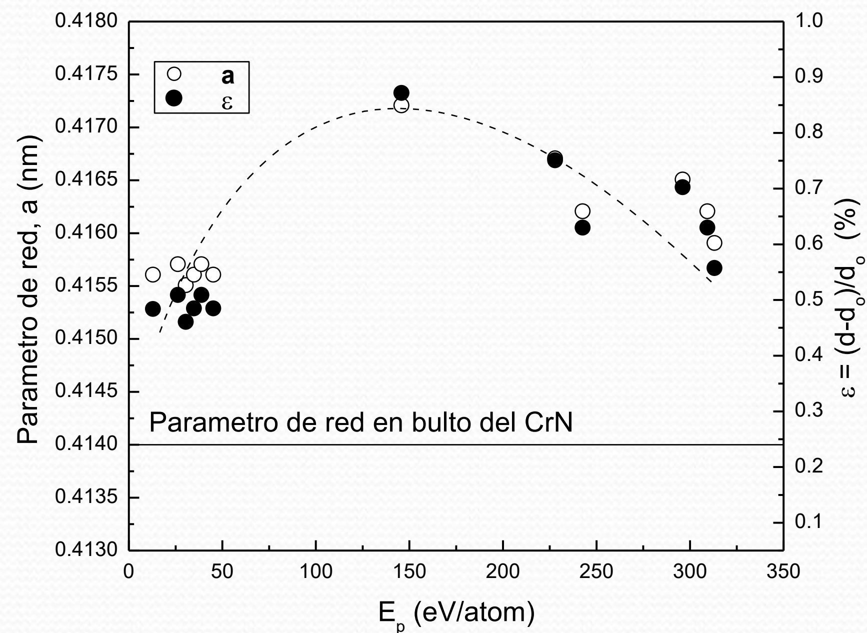
Intensidad normalizada
I200/ITotal
I220/ITotal
I111/ITotal
1.0
0.8
0.2
0.0
0
50
100
150
200
250
300
350
Ep (eV/atom)



(a)
1 μm
(b)
1 μm



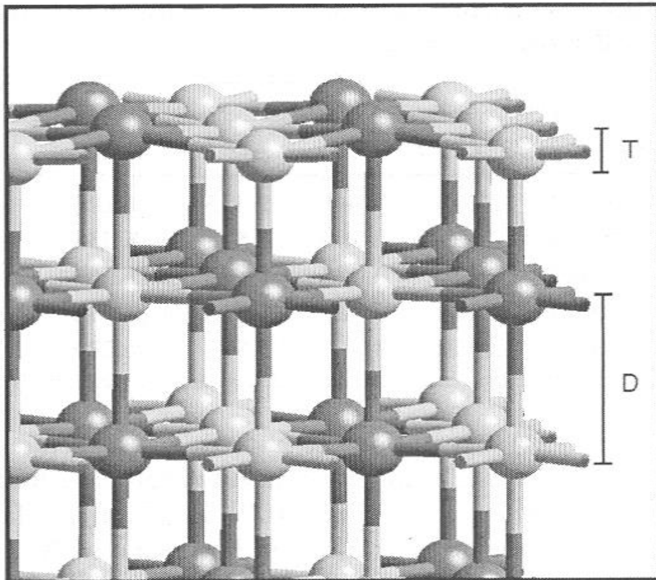
Tamaño de grano
Ajuste lineal
Tamaño del grano (nm)
45
40
35
30
25
0
50
100
150
200
250
300
350
Ep (eV/atom)



a
ε
Parametro de red, a (nm)
ε = (d-do)/do (%)
Parametro de red en bulto del CrN
0.4180
0.4175
0.4170
0.4165
0.4160
0.4155
0.4150
0.4145
0.4140
0.4135
0.4130
1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
50
100
150
200
250
300
350
Ep (eV/atom)

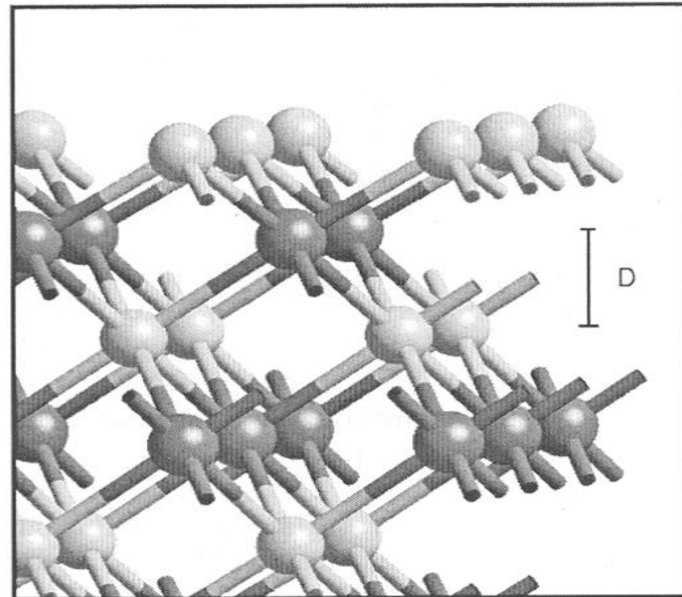
$$W_{hkl} = S_{hkl} + U_{hkl}$$

Superficie (200)

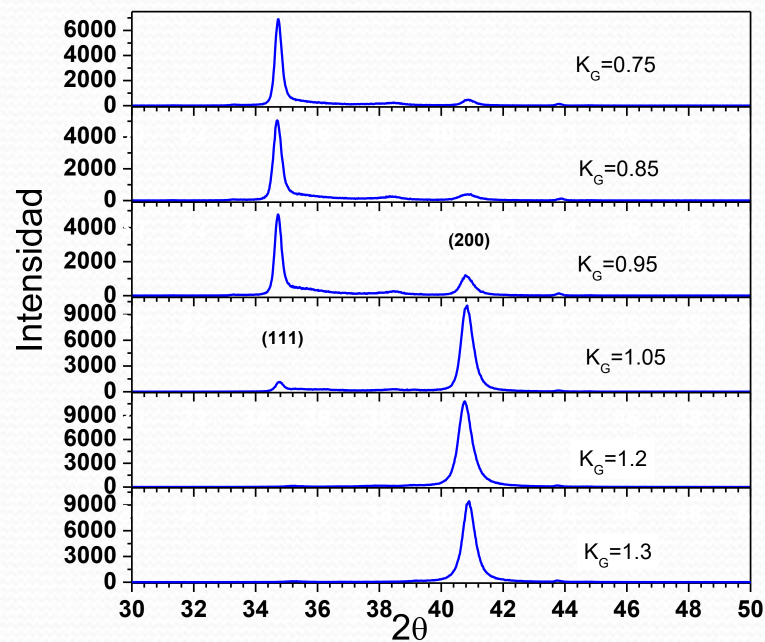


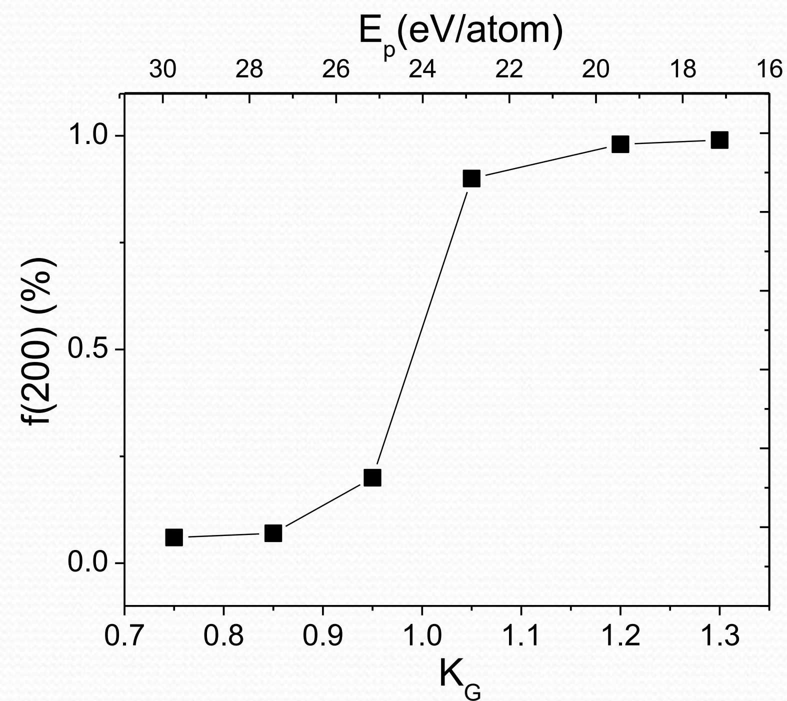
$$S_{hkl} = \Delta H_s N_{hkl}/Z \quad (J/m^2)$$

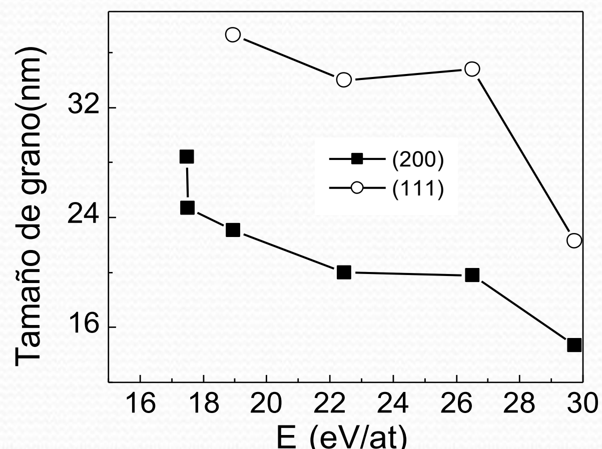
Superficie (111)

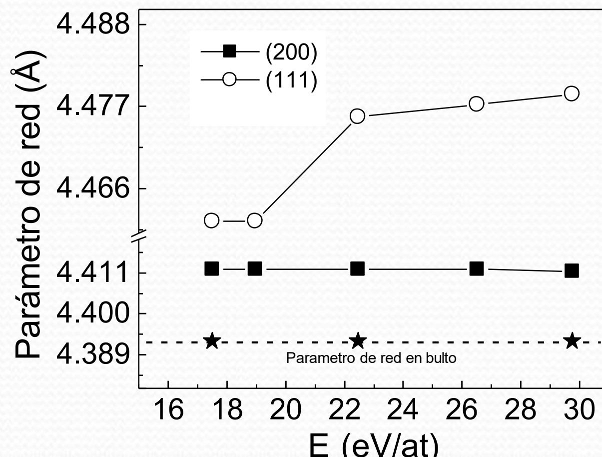


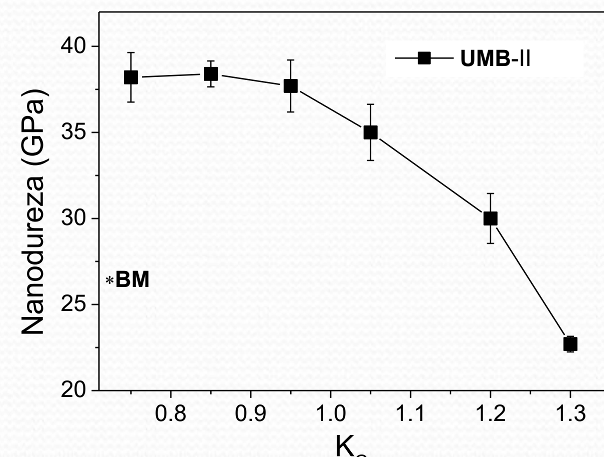
$$U_{hkl} = \varepsilon^2_{hkl} . E_{hkl} . (1- \gamma)$$


Intensidad
K_G=0.75
K_G=0.85
K_G=0.95
K_G=1.05
K_G=1.2
K_G=1.3
(200)
(111)
6000
4000
2000
0
4000
2000
0
4000
2000
0
9000
6000
3000
0
9000
6000
3000
0
9000
6000
3000
0
30
32
34
36
38
40
42
44
46
48
50
2θ


E_p(eV/atom)
30
28
26
24
22
20
18
16
f(200) (%)
1.0
0.5
0.0
0.7
0.8
0.9
1.0
1.1
1.2
1.3
K_G


Tamaño de grano(nm)
32
24
16
(200)
(111)
16
18
20
22
24
26
28
30
E (eV/at)


Parámetro de red (Å)
4.488
4.477
4.466
4.411
4.400
4.389
(200)
(111)
Parametro de red en bulto
16
18
20
22
24
26
28
30
E (eV/at)


Nanodureza (GPa)
40
35
30
25
20
UMB-II
*BM
0.8
0.9
1.0
1.1
1.2
1.3

SOLIDOS NO CRISTALINOS

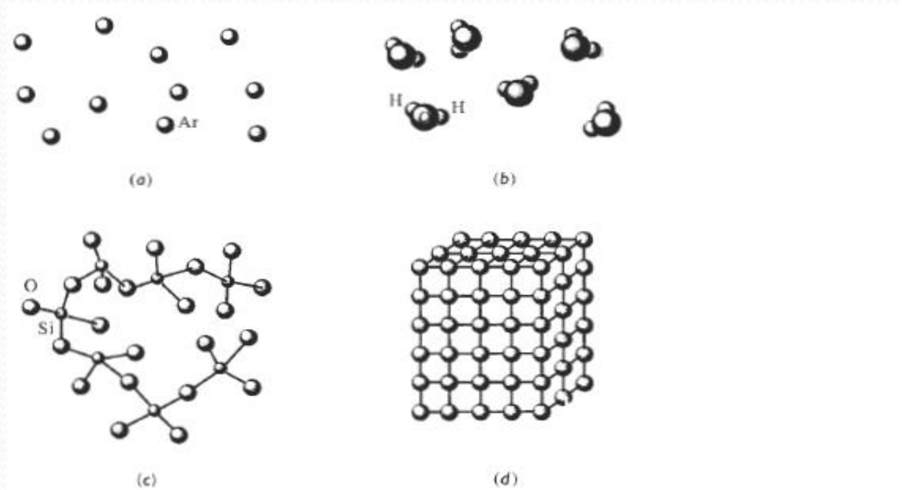


FIGURA 3-1 Los niveles del arreglo atómico en los materiales: (a) los gases inertes no tienen un orden regular en sus átomos. (b, c) Algunos materiales, incluyendo el vapor de agua y el vidrio, tienen orden en una distancia muy corta. (d) Los metales y muchos otros sólidos tienen un orden regular de los átomos que se extiende por todo del material.

El SiO_2 se enfría rápido para que los átomos no alcancen a recuperar un arreglo a largo alcance.

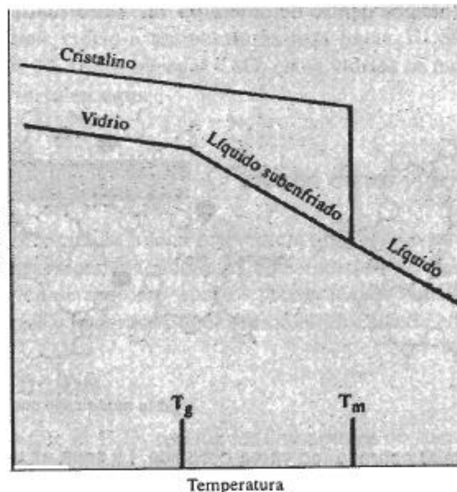
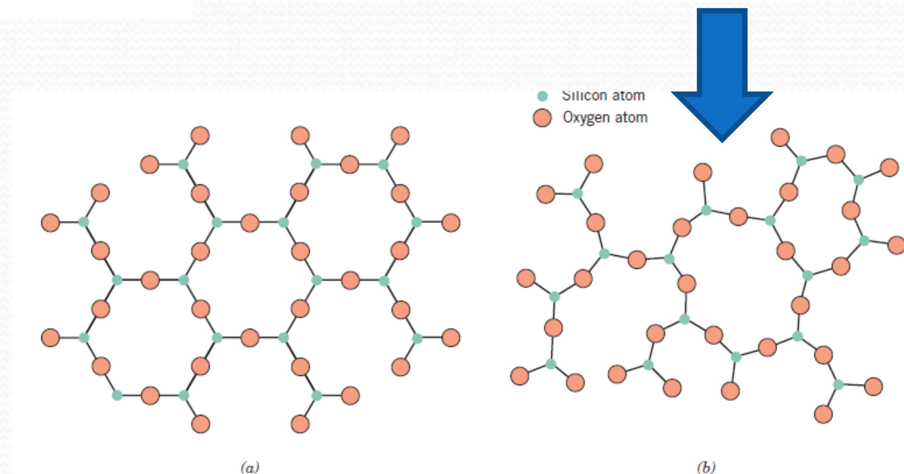
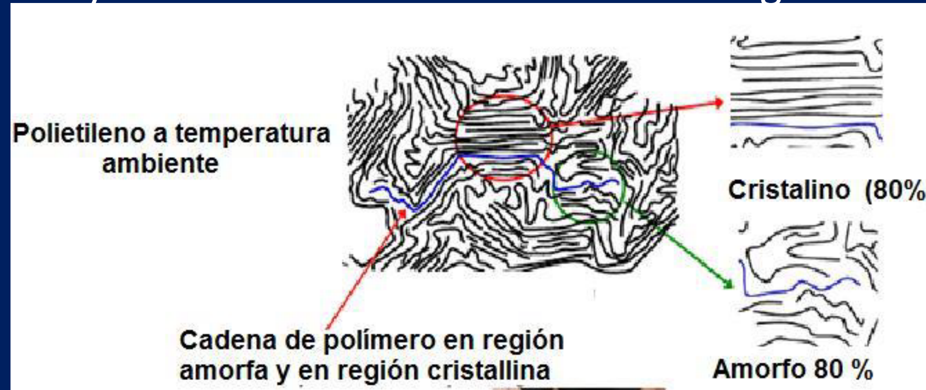


FIGURA 14-15 Cuando el sílice se cristaliza durante el enfriamiento, se observa un cambio súbito de densidad. Para el sílice vítreo, sin embargo, el cambio en la pendiente de la temperatura de transición del vidrio indica la formación de un vidrio a partir del líquido subenfriado.



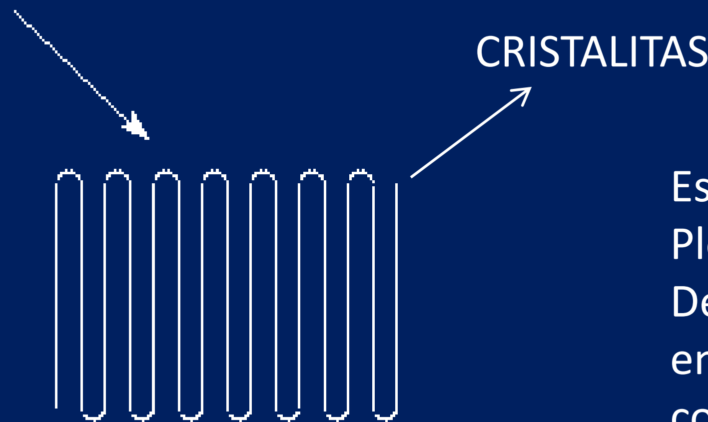
Polímeros cristalinos

Las cadenas se acercan y se alinean estrechamente a lo largo de distancias apreciables



La mayoría de los polímeros no se estiran completamente como ésto. En cambio se pliegan sobre sí mismos luego de estar estirados durante una corta distancia, como ésto.

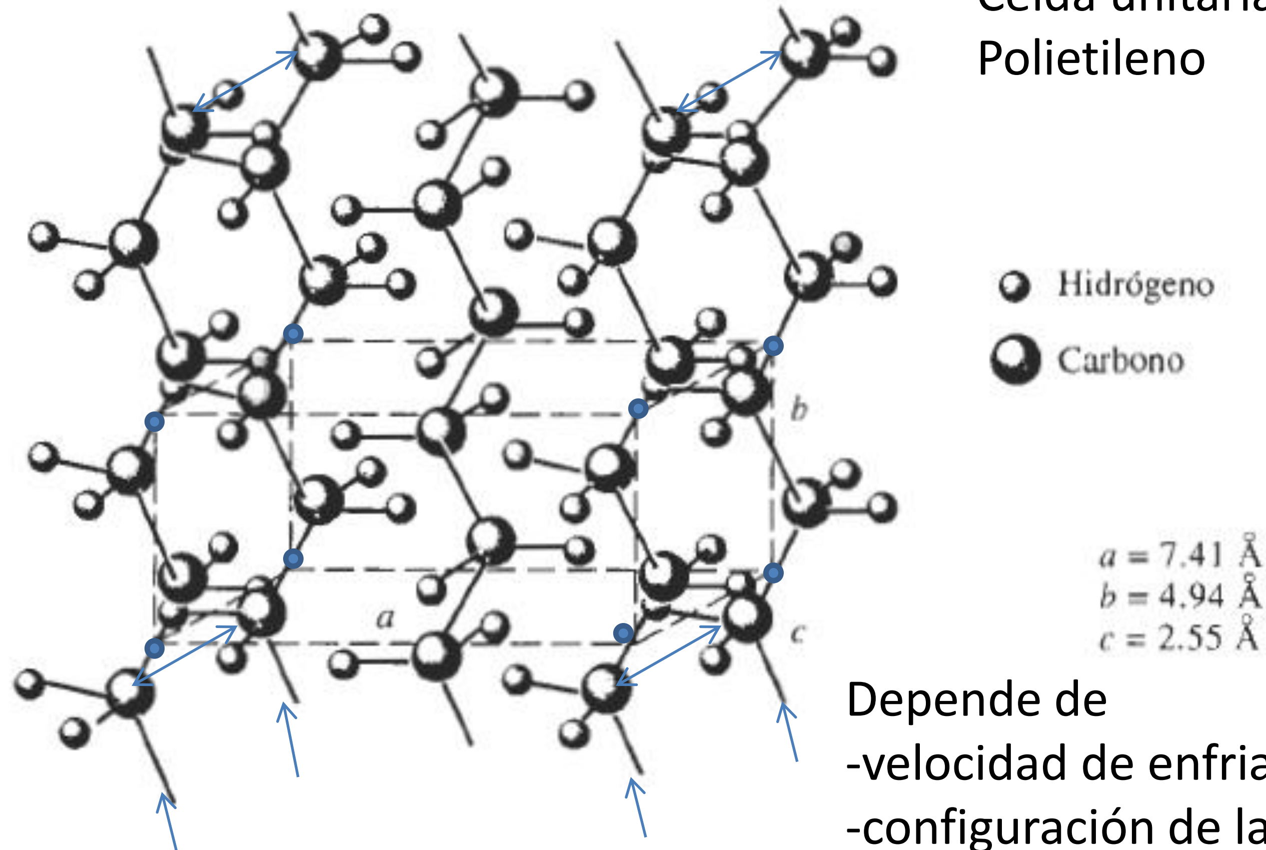
CRISTALITAS



Estructura de cadenas Plegadas.
Dependerá de la velocidad de enfriamiento y la configuración de la cadena. Se facilita en polímeros lineales.

Se produce un empaquetamiento
Ordenado de las cadenas

Celda unitaria ortorómbica
Polietileno



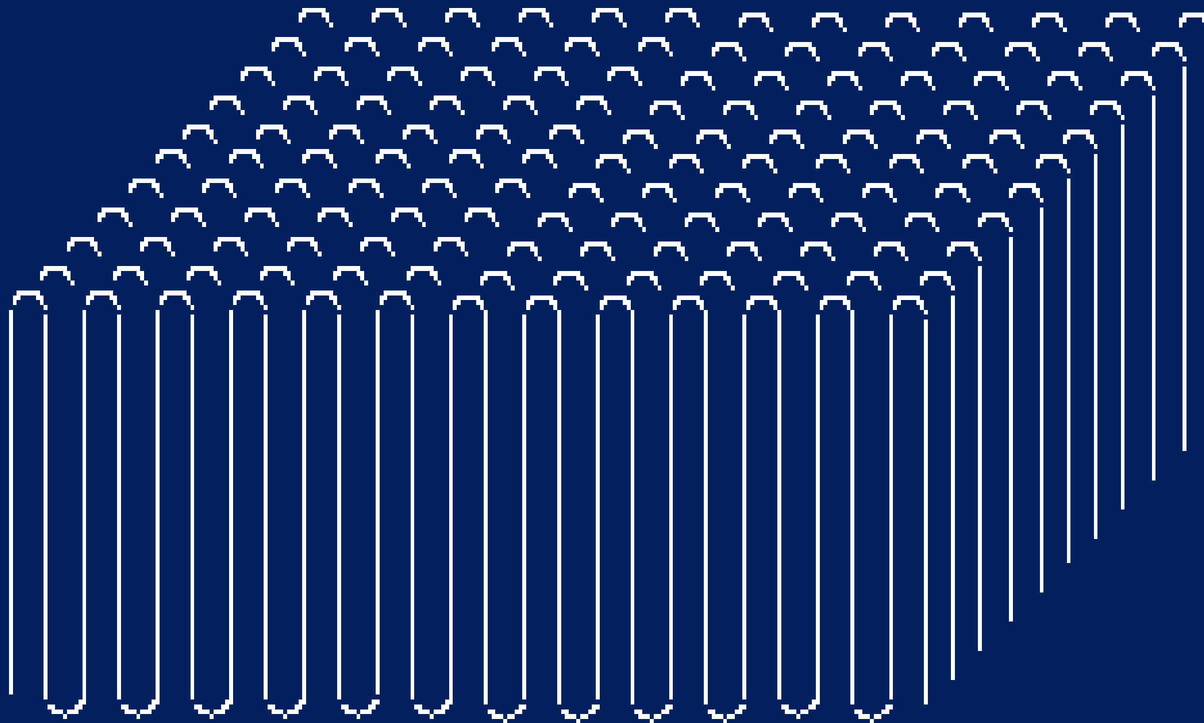
Depende de
-velocidad de enfriamiento (lenta)
-configuración de la cadena

FIGURA 3-30 Celda unitaria del polietileno cristalino.

TABLA 15-3 Estructuras cristalinas de varios polímeros

Polímero	Estructura cristalina	Parámetros de red (nm)		
Polietileno	Ortorrómbica	$a_0 = 0.742$	$b_0 = 0.495$	$c_0 = 0.255$
Polipropileno	Ortorrómbica	$a_0 = 1.450$	$b_0 = 0.569$	$c_0 = 0.740$
Cloruro de polivinilo	Ortorrómbica	$a_0 = 1.040$	$b_0 = 0.530$	$c_0 = 0.510$
Poliisopreno (cis)	Ortorrómbica	$a_0 = 1.246$	$b_0 = 0.886$	$c_0 = 0.810$

MODELO DE CADENAS PLEGADAS



Esferulitas es un agregado de Cristalitas Estan intercaladas en una matriz amorfa

Son placas delgadas o laminillas con un espesor de 10 – 100 nm y con longitudes de aprox. 10 *u*m.

No sólo que pueden plegarse, sino también apilarse. Un apilamiento de cadenas poliméricas plegadas sobre sí mismas, como ésto, recibe el nombre de *lamella*.

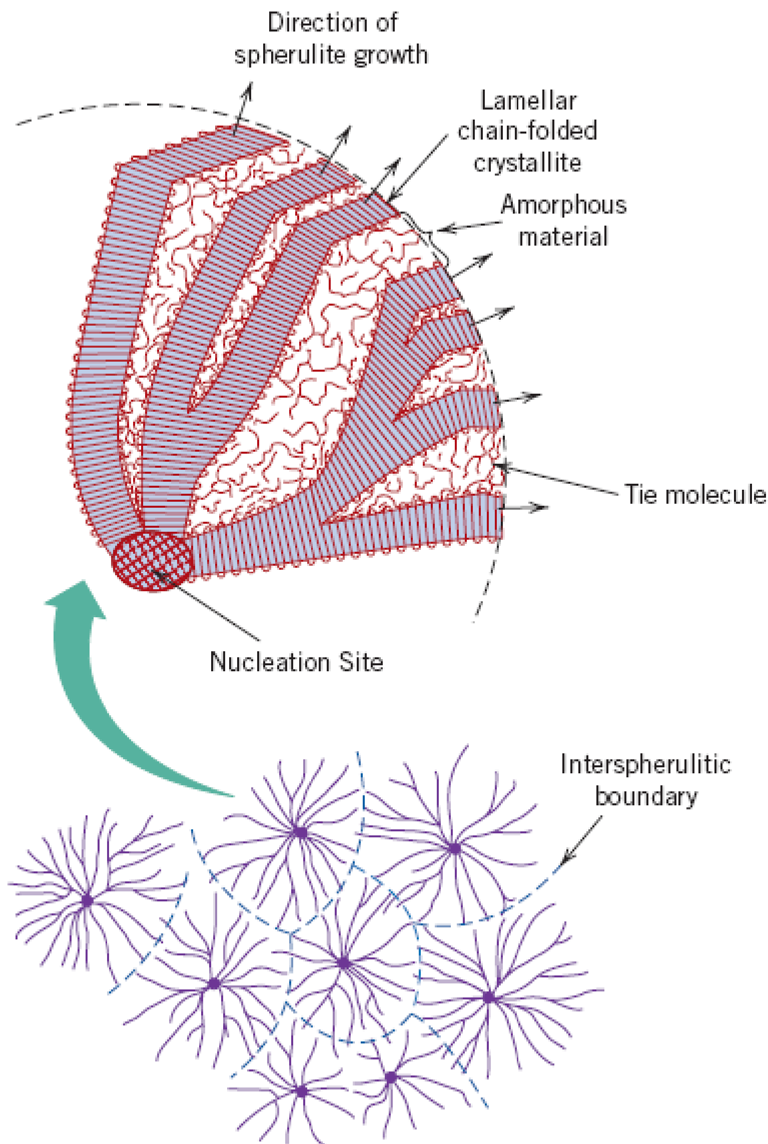


Figure 14.13 Schematic representation of the detailed structure of a spherulite.

-En polímeros formados con adición simple. Evita átomos que no interfieran en la compactación de las cadenas.
- Enfriamiento lento
- Recocido
- Cadenas pequeñas
-Deformación lenta en el enfriamiento

Varias Esferulitas.
Ejemplos: Polietileno, polipropileno, cloruro de polivilino, nylon, etc.

•Se debe tener en cuenta la difusión en el polímero de gases como el O_2, H_2O, CO_2 y CH_4 entre las cadenas moleculares : Se debe tener en cuenta la permeabilidad y absorción.
•Se prefieren estructuras cristalinas, son mas densas.
• La difusión se genera por huecos entre las cadenas poliméricas desde una región amorfa abierta a otra abierta adyacente.

Bibliografía

• ASHBY, MICHAEL F.	Engineering Materials 1 - An introduction to properties, applications and design.	ELSEVIER Pergamon Press. Oxford.	2012
• ASHBY, MICHAEL F.	Engineering Materials 2 - An introduction to microstructures and processing.	ELSEVIER Pergamon Press. Oxford.	2012
• ASHBY, MICHAEL F.	Materials selection in mechanical design.	ELSEVIER Pergamon Press. Oxford.	2005
• MANGONON, PAT L.	Ciencia de materiales.	PRENTICE HALL	2001
• CALLISTER, WILLIAM D.	Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales.	REVERTE	1997
• SMITH WILLIAM F.	Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales	MC GRAW HILL	1999
• AVNER	Introducción a la metalurgia física, Manual de normas	MC GRAW HILL	
• Charles & Crane	Selection and use of engineering materials.	BUTTERWORTH HEINEMANN LTD, WILTSHIRE	1989
• BOLTON	Materials and their uses	BUTTERWORTH HEINEMANN LTD, OXFORD	1996
• EASTERLING	Tomorrow materials.	The institute of metals, London	1988
• MUNZ	Caramic materials: Mechanical properties, failure behaviour and materials selection.	Springer	2001
• BUDINSKI	Engineering materials: properties and selection.	PRENTICE HALL	2004

Bibliografía

Se recomienda revisar bibliografía actualizada de los siguientes textos:

1. - Ciencia e Ingeniería de Materiales, William Smith
2. - Ciencia i. e ingeniería. de los materiales. Donald Askelan
3. - I n t r o d u c c i ó n a l a Ciencia e Ingeniería de los Materiales. W i l l ik m d C a l l i s t e r
4. Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros para, 6 ta edición, Shackelford
5. - Introducción a la Física del Estado Sólido, Charles Kittel
6. - Introducción a la Metalurgia Física. Sydney Avner

Otros:

Estrutura atomica y enlace quimico Jaume Casabo Gispert
Reacciones y enlace quimico Universidad autonoma Metropolitana
http://xplociencias.wordpress.com/2013/03/22/grafeno-el-material-mas-fuerte-jamas-visto-podria-tener-aplicacion-en-la-industria-alimentaria/
http://quimicanaturaleza.blogspot.com/2013/07/grafeno-ventajas-y-desventajas.html
Tesis de doctorado en Ingeniería, Jhon Jairo Olaya
Notas de clase y google.

Ciencia e Ingeniería de Materiales

- Se ocupa de inventar nuevos materiales y mejorar los ya conocidos, mediante el desarrollo de un conocimiento más profundo de las relaciones entre microestructura, composición y su síntesis/procesamiento.

Además:

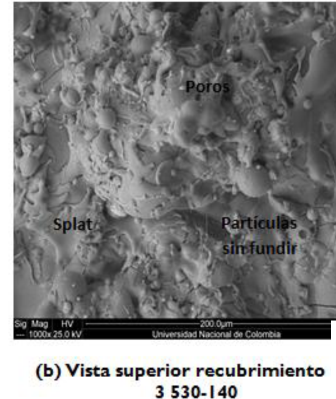
- ES INTERDICIPLINARIO
- SE FUNDAMENTA EN CONOCIMIENTOS DE FÍSICA QUÍMICA E INGENIERÍA, ASÍ COMO LAS TÉCNICAS INHERENTES A ESTAS DISCIPLINAS.
- CUENTA CON UN LEGUNAJE COMÚN Y PRESENTA DIFERENTES ORIENTACIONES SEGÚN EL MATERIAL DE ESTUDIO.

Ciencia e Ingeniería de Materiales

Ciencia

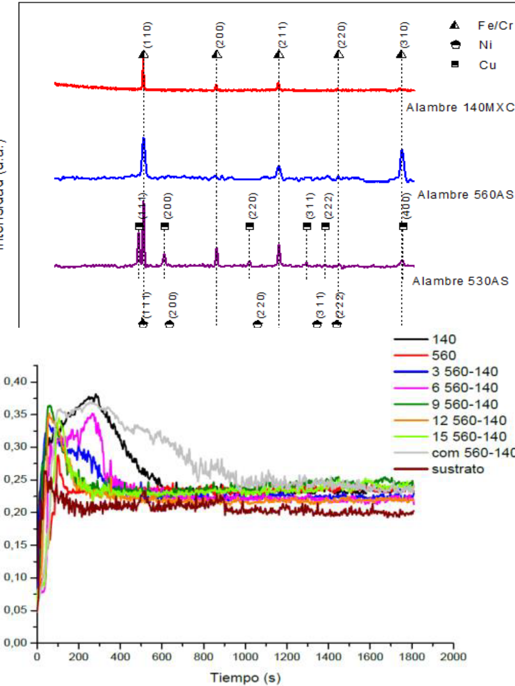






(a) Vista transversal recubrimiento 3 530-140

(b) Vista superior recubrimiento 3 530-140



Ingeniería

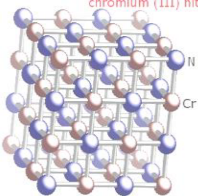












ANTECEDENTES

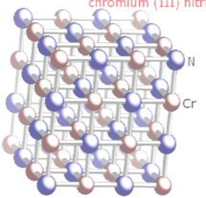
Materiales en el Mundo-JAPON

Unión Europea
Estados Unidos
Japón

2.0
1.5
1.0
0.5
0.0

Medicina
Biología/ Ciencias de la vida
Materiales
Química
Ingeniería/ Informatica
Ciencias de la Tierra y el Espacio

Fuente: Informe de la UNESCO sobre la Ciencia 2005



ANTECEDENTES

Materiales en el Mundo-JAPON

Figure 6
PROFILE OF JAPANESE SCIENCE AND ENGINEERING, 1982–2002

Chemistry
Physics/materials science
Engineering/computer science
Clinical medicine
Earth/space sciences
Biology/life sciences

World average

Degree of specialization

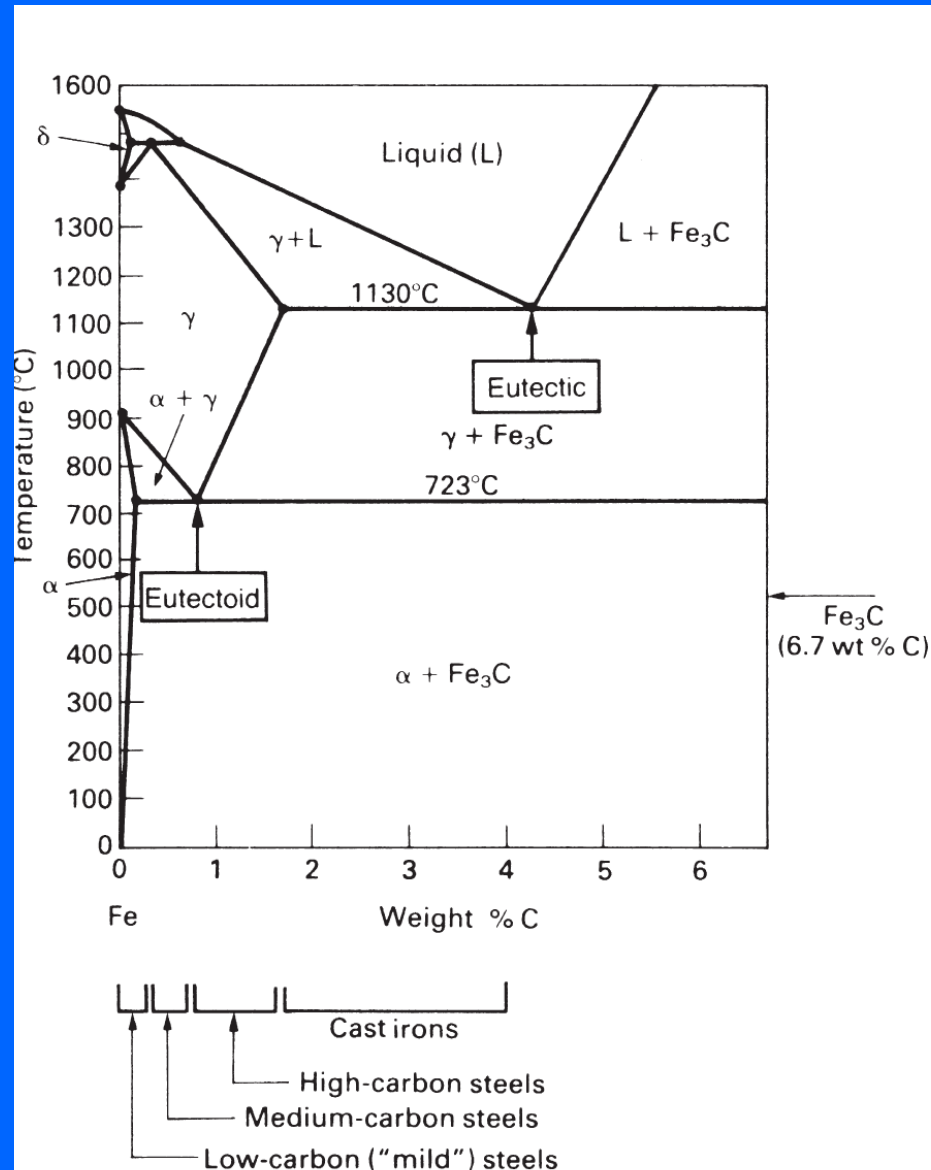
1.8
1.6
1.4
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0

1982 1984 1986 1988 1990 1992 1994 1996 1998 2000 2002

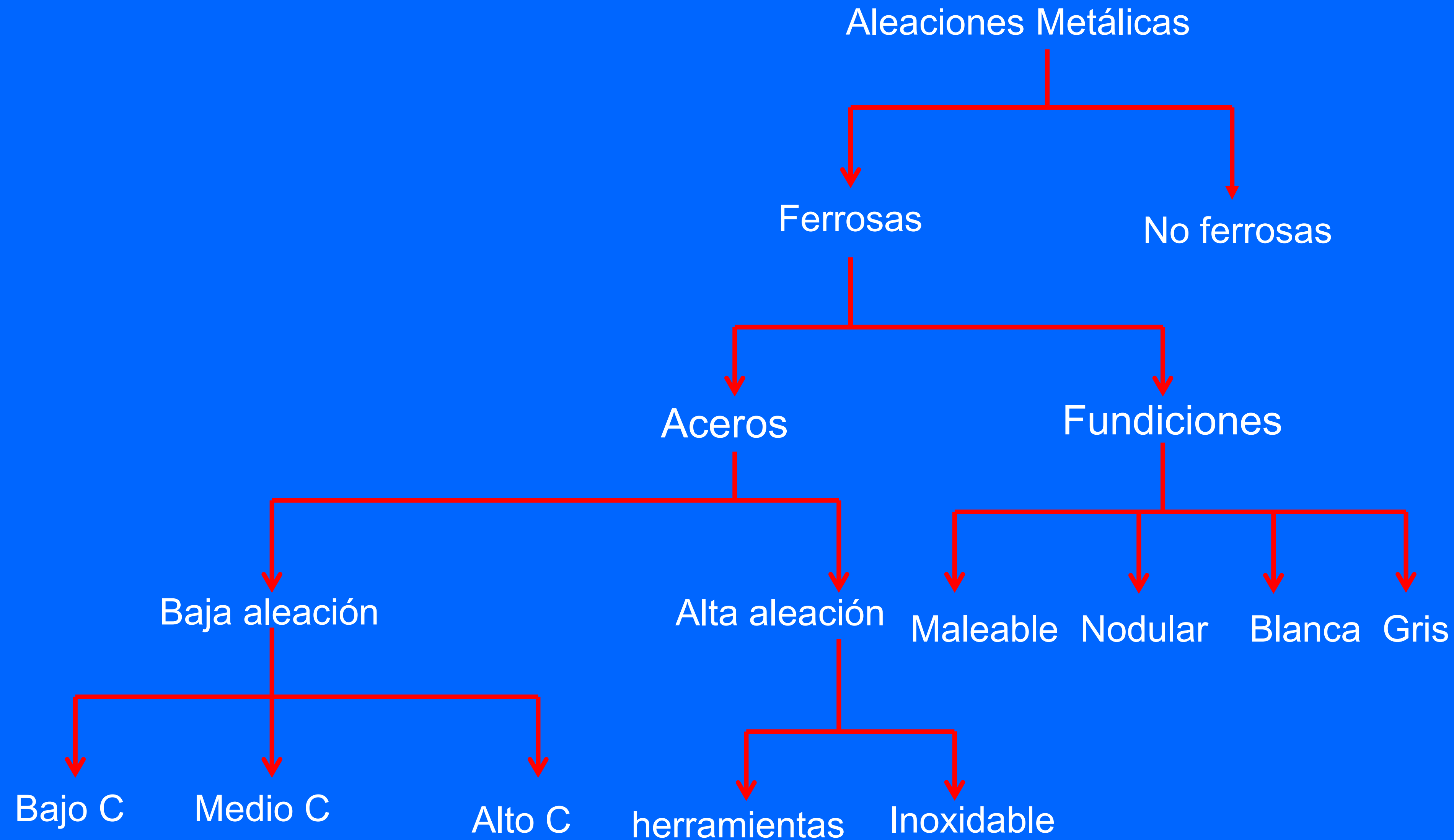
Source: NISTEP (2004) *Science and Technology Indicators*, based on the data in *National Science Indicators 1981–2002* (Deluxe version) compiled by the Institute for Scientific Information.

CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES

Aceros: Región eutectoide del diagrama Fe-C



CLASIFICACIÓN DE LAS ALEACIONES FERROSAS



ALEACIONES FERROSAS

Aceros: 0.05% - 2% C

- Aceros al carbono y baja aleación: 0.003 -1.2 % C, 0.25 -1% Mn Si (max. 0.6%) y Cu (max. 0.6%)

Tienen baja resistencia a la corrosión y pueden lograr resistencias hasta 690 MPa.

- Aceros dulces: 0.15 % C
- Aceros de bajo carbono: 0.15 – 0.3 % C
- Aceros de medio carbono: 0.3 – 0.6% C
- Aceros de alto carbono: > 0.6% C

ALEACIONES FERROSAS

Aceros aleados

-Aceros Aleados: Tienen Mn (>1.65%) Si (>0.6%) y Cu (>0.6%)

Alfágenos (Nb, V,Cr, W, V, Al y Si)

Gammágenos (Cu, C, N, Ni, Mn), otros como el Ti, Mn, Co, B, etc.

Formadores de carburos (Alfágenos, Ti y Mn)

Los elementos aleantes aumentan la templabilidad

- Aceros de baja aleación < 5% de elementos aleantes (económicos)

- Aceros de alta aleación >5% de elementos aleantes: Aceros inoxidables (>12% Cr) y aceros para herramientas (W, Mo, Cr, y V)

- Aceros de alta resistencia y baja aleación: < 0.2%C + Nb, V , Ti

- Fundiciones: 2% - 4.5% C

Ejemplos:

10XX Acero al carbono

11XX Acero al carbono con alto contenido de S y bajo P

13XX Acero al Manganeso (1.75%)

40XX Acero al Mo (0.2%)

41XX Acero al Cr (0.5-0.95)% Mo (0.12-0.30)%

43XX Acero al Ni-Cr-Mo (1.65 – 0.7 – 0.2)%

51XX Acero al cromo (0.8-1.0)%

61XX Cr - Vanadio

86XX Acero al Ni-Cr-Mo (0.55 – 0.5 – 0.2)%

AISI: Instituto Americano del Hierro y el Acero

SAE: Sociedad de ingenieros de automoción

Tabla 12.2a Sistemas de designación AISI/SAE y UNS y tramos de composición para aceros al carbono y aceros de baja aleación

Designación AISI/SAE[a]	*Designación UNS*	*Tramos de composición (% en peso de elementos aleantes distintos del C)*[b]			
		Ni	*Cr*	*Mo*	*Otros*
10xx, Al carbono	G10xx0				
11xx, Fácil mecanizado	G11xx0				0,08-0,33S
12xx, Fácil mecanizado	G12xx0				0,10-0,35S 0,04-0,12P
13xx	G13xx0				1,60-1,90Mn
40xx	G40xx0			0,20-0,30	
41xx	G41xx0		0,80-1,10	0,15-0,25	
43xx	G43xx0	1,65-2,00	0,40-0,90	0,20-0,30	
46xx	G46xx0	0,70-2,00		0,15-0,30	
48xx	G48xx0	3,25-3,75		0,20-0,30	
51xx	G51xx0		0,70-1,10		
61xx	G61xx0		0,50-1,10		0,10-0,15V
86xx	G86xx0	0,40-0,70	0,40-0,60	0,15-0,25	
92xx	G92xx0				1,80-2,20Si

[a] Para cada tipo específico de acero, la concentración de carbono, en % en peso multiplicado por 100, se pone en lugar de "xx".

[b] Excepto para las aleaciones 13xx, la concentración de manganeso es menor que 1,00%.
Excepto para las aleaciones 12xx, la concentración de fósforo es menor que 0,35%.
Excepto para las aleaciones 11xx, la concentración de azufre es menor que 0,04%.
Excepto para las aleaciones 92xx, la concentración de silicio varía entre un 0,15% y un 0,35%.

Tabla 12.2b Aplicaciones típicas e intervalo de propiedades mecánicas de aceros al carbono y templados en aceite y revenidos

Número AISI	*Número UNS*	*Intervalo de propiedades mecánicas*			*Aplicaciones típicas*
		Resistencia a la tracción [psi × 10^3(MPa)]	*Límite elástico* [psi × 10^3(MPa)]	*Ductilidad* (% El en 2pulg.)	
Aceros al carbono					
1040	G10400	88–113 (605–780)	62–85 (430–585)	33–19	Cigueñales, pernos
1080[a]	G10800	116–190 (800–1310)	70–142 (480–980)	24–13	Cinceles, martillos
1095[a]	G10950	110–186 (760–1280)	74–120 (510–830)	26–10	Cuchillos, hojas de sierra
Aceros aleados					
4063	G40630	114–345 (786–2380)	103–257 (710–1770)	24–4	Muelles, herramientas
4340	G43400	142–284 (980–1960)	130–228 (895–1570)	21–11	Casquillos, tubos para aviación
6150	G61500	118–315 (815–2170)	108–270 (745–1860)	22–7	Ejes, pistones, engranajes

Acero Inox. Ferrítico: 12-30% Cr (bcc)

Acero Inox. Martensítico 12-17% Cr y alto contenido de carbono (0.15-1.5%)

Acero Inox. Austenitico16-25% Cr y 7-20% Ni (fcc)

		Composition (wt %)[a]							
Type	**UNS number**	**C**	**Mn**	**Si**	**Cr**	**Ni**	**Mo**	**Cu**	**Al**
Austenitic Types									
201[b]	S20100	0.15	5.5–7.5	1.00	16.0–18.0	3.5–5.5			
304	S30400	0.08	2.00	1.00	18.0–20.0	8.0–10.5			
310	S31000	0.25	2.00	1.50	24.0–26.0	19.0–22.0			
316	S31600	0.08	2.00	1.00	16.0–18.0	10.0–14.0	2.0–3.0		
347[c]	S34700	0.08	2.00	1.00	17.0–19.0	9.0–13.0			
Ferritic Types									
405	S40500	0.08	1.00	1.00	11.5–14.5				0.10–0.30
430	S43000	0.12	1.00	1.00	16.0–18.0				
Martensitic Types									
410	S41000	0.15	1.00	1.00	11.5–13.0				
501	S50100	0.10 min	1.00	1.00	4.0–6.0		0.40–0.65		
Precipitation-Hardening Types									
17–4 PH[d]	S17400	0.07	1.00	1.00	15.5–17.5	3.0–5.0		3.0–5.0	
17–7 PH	S17700	0.09	1.00	1.00	16.0–18.0	6.5–7.75			0.75–1.5

Source: Data from *Metals Handbook*, 9th ed., Vol. 3, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1980.

[a] Single values are maximum values unless otherwise indicated.

[b] 0.25 wt % N.

[c] $10 \times \%C = \min Nb + Ta$ (optional).

[d] 0.15 – 0.45wt % Nb+Ta.

Table 11.2

Alloy Designations for Some Common Stainless Steels.

Introduction to Materials Science for Engineers, Sixth Edition by James F. Shackelford.
ISBN 0-13-1-42486-6.

Acero	% C	% Cr	% Ni	Otros	Resistencia mecánica la tensión (psi)	Esfuerzo de cedencia (psi)	% elongación	Estado
Austenítico:								
201	0.15	17	5	6.5%Mn	95,000	45,000	40	Recocido
304	0.08	19	10		75,000	30,000	30	Recocido
					185,000	140,000	9	Deformado en frío
304L	0.03	19	10		75,000	30,000	30	Recocido
316	0.08	17	12	2.5% Mo	75,000	30,000	30	Recocido
321	0.08	18	10	0.4% Ti	85,000	35,000	55	Recocido
347	0.08	18	11	0.8% Nb	90,000	35,000	50	Recocido
Ferrítico:								
430	0.12	17			65,000	30,000	22	Recocido
442	0.12	20			75,000	40,000	20	Recocido
Martensítico:								
416	0.15	13		0.6% Mo	180,000	1 40,000	18	Templado y revenido
431	0.20	16	2		200,000	1 50,000	16	Templado y revenido
440C	1.10	17		0.7% Mo	285,000	275,000	2	Templado y revenido
Endurecimiento por precipitación:								
17-4	0.07	17	4	0.4% Nb	190,000	170,000	10	Endurecido por envejecimiento
17-7	0.09	17	7	1.0% Al	240,000	230,000	6	Endurecido por envejecimiento

Codificación de Aceros para Herramientas, según AISI		
Grupo	Símbolo	Descripción
Alta velocidad (rápidos)	T	Base Tugsteno (%W: 11.75-19)
Alta velocidad (rápidos)	M	Base Molibdeno (%Mo: 3.25-10.0)
Trabajo en caliente	H	Base Cr, W, Mo
Trabajo en frío	A	Media aleación, temple al aire
Trabajo en frío	D	Alto Cr, alto C (%Cr: 11.5-13.5)
Trabajo en frío	O	Templables al aceite
Resistencia al impacto	S	Medio carbono, al Si
Propósitos específicos	L	Baja aleación, medio-alto carbono
Propósitos específicos	F	Alto carbono, al W
Moldes	P	Baja aleación, bajo carbono
Templables al agua	W	Alto carbono

GRUPO	SIMBOLO Y TIPO	
Templados en agua	W	
Resistentes al impacto	S	
Trabajo en frío	O A D	Templable en aceite Mediana aleación y templable en aire Alto carbono, alto cromo
Trabajo en caliente	H	(H1-H19, incluso, base cromo; H20-H39, incluso, base tungsteno; H40-H59, incluso, base molibdeno)
Alta velocidad	T M	Base tungsteno Base molibdeno
Moldes	P	Aceros para moldes (P1-P19, incluso, bajo carbono; P20-P-39, incluso, otros tipos)
Propósitos específicos	L F	Baja aleación Carbono-tungsteno



Tabla 12.3 Designaciones, composiciones y aplicaciones de seis aceros de herramientas

Número AISI	*Número UNS*	Composición (% en peso)[a]						*Aplicaciones típicas*
		C	*W*	*Mo*	*Cr*	*V*	*Otros*	
W1	T72301	0,6-1,4	.					Herramientas de herrería y carpintería
S1	T41901	0,5	2,50		1,50			Cortatubos, brocas para cemento
O1	T31501	0,90	0,50		0,50		1,00Mn	Hojas de corte, herramientas cortantes
A1	T30102	1,0						Troqueles, matrices de estampado
D2	T30402	1,50		1,00	5,00			Cuchillería, matrices de estiramiento
M1	T11301	0,85	1,50	1,00	12,00	1,00		Brocas, sierras, herramientas de torno y de acepillar
				8,50	4,00	1,00		

[a] Composición de los diferentes aceros

Fuente: *Metal Progress 1982 Materials ands Processing Databook*, Copyright © 1982 American Society for Metals.

Designations			Composition (wt %)								
AISI	**SAE**	**UNS**	**C**	**Mn**	**Si**	**Cr**	**Ni**	**Mo**	**W**	**V**	**Co**
Molybdenum high-speed steels											
M1	M1	T11301	0.78–0.88	0.15–0.40	0.20–0.50	3.50–4.00	0.30 max	8.20–9.20	1.40–2.10	1.00–1.35	
Tungsten high-speed steels											
T1	T1	T12001	0.65–0.80	0.10–0.40	0.20–0.40	3.75–4.00	0.30 max		17.25–18.75	0.90–1.30	
Chromium hot-work steels											
H10		T20810	0.35–0.45	0.25–0.70	0.80–1.20	3.00–3.75	0.30 max	2.00–3.00		0.25–0.75	
Tungsten hot-work steels											
H21	H21	T20821	0.26–0.36	0.15–0.40	0.15–0.50	3.00–3.75	0.30 max		8.50–10.00	0.30–0.60	
Molybdenum hot-work steels											
H42		T20842	0.55–0.70	0.15–0.40		3.75–4.50	0.30 max	4.50–5.50	5.50–6.75	1.75–2.20	
Air-hardening medium-alloy cold-work steels											
A2	A2	T30102	0.95–1.05	1.00 max	0.50 max	4.75–5.50	0.30 max	0.90–1.40		0.15–0.50	
High-carbon, high-chromium cold-work steels											
D2	D2	T30402	1.40–1.60	0.60 max	0.60 max	11.00–13.00	0.30 max	0.70–1.20		1.10 max	1.00 ma:
Oil-hardening cold-work steels											
O1	O1	T31501	0.85–1.00	1.00–1.40	0.50 max	0.40–0.60	0.30 max		0.40–0.60	0.30 max	
Shock-resisting steels											
S1	S1	T41901	0.40–0.55	0.10–0.40	0.15–1.20	1.00–1.80	0.30 max	0.50 max	1.50–3.00	0.15–0.30	
Low-alloy, special-purpose tool steels											
L2		T61202	0.45–1.00	0.10–0.90	0.50 max	0.70–1.20		0.25 max		0.10–0.30	
Low-carbon mold steels											
P2		T51602	0.10 max	0.10–0.40	0.10–0.40	0.75–1.25	0.10–0.50	0.15–0.40			
Water-hardening tool steels											
W1	W108 W109 W110 W112	T72301	0.70–1.50	0.10–0.40	0.10–0.40	0.15 max	0.20 max	0.10 max	0.15 max	0.10 max	

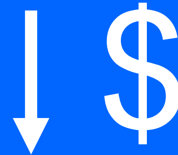
Source: Data from *Metals Handbook*, 9th ed., Vol. 3, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1980.

Fundiciones: 2-4.5%C y 1-4% Si

- Mn < 1.5%, P < 1.8% y S < 0.25%

-EL Si con contenidos mayores a 1% y enfriamientos lentos forman el grafito

- Otros elementos aleantes: Cu, Ni, Mo. Ti, Al, Cr, otros



- Se fabrican en cubilotes a partir de chatarra o arrabio. La grafitización se gradúa con la composición química del Si y la velocidad de enfriamento

-Alta resistencia al desgaste y a la corrosión

-Baja resistencia al impacto y baja ductilidad: Dificultad su conformado por deformación plástica

-La temperatura de operación es inferior a la de los aceros

Tipos de fundiciones (región eutectica):

Blancas, Grises, Nodular, Maleables (europeas y americanas), Atruchadas y aleadas (de baja y alta aleación)


(a)

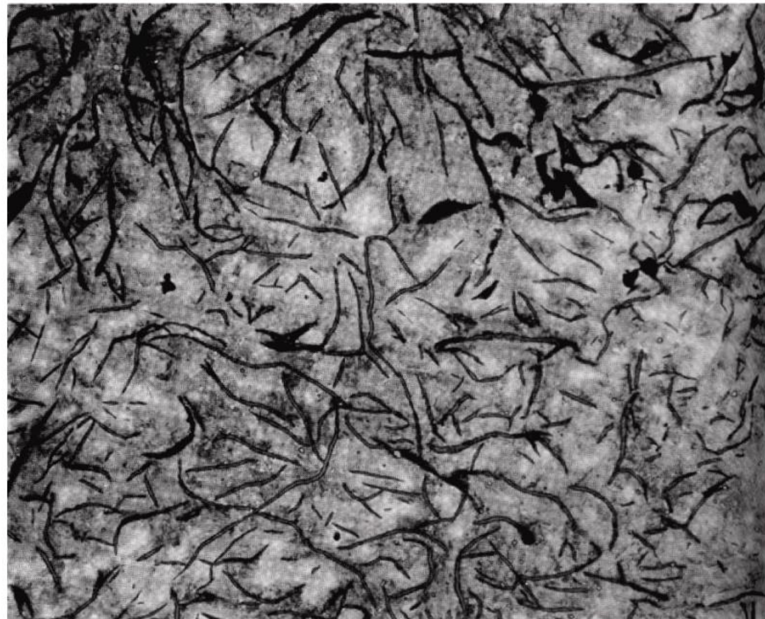
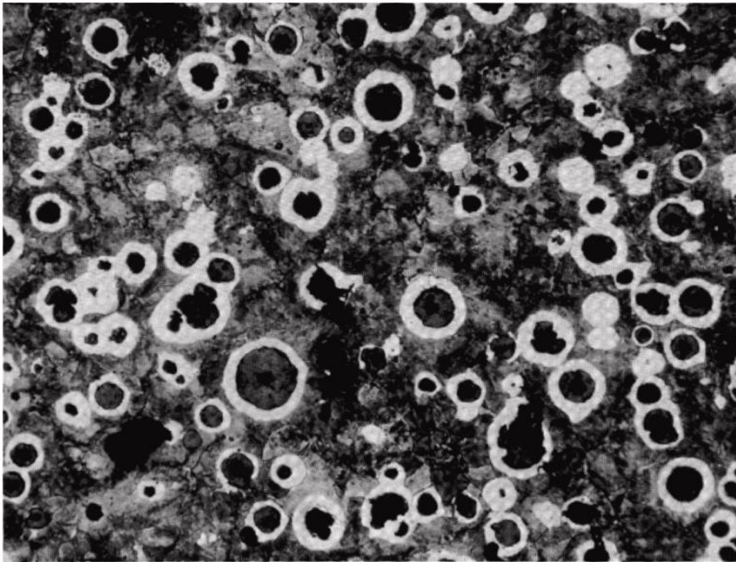

(b)

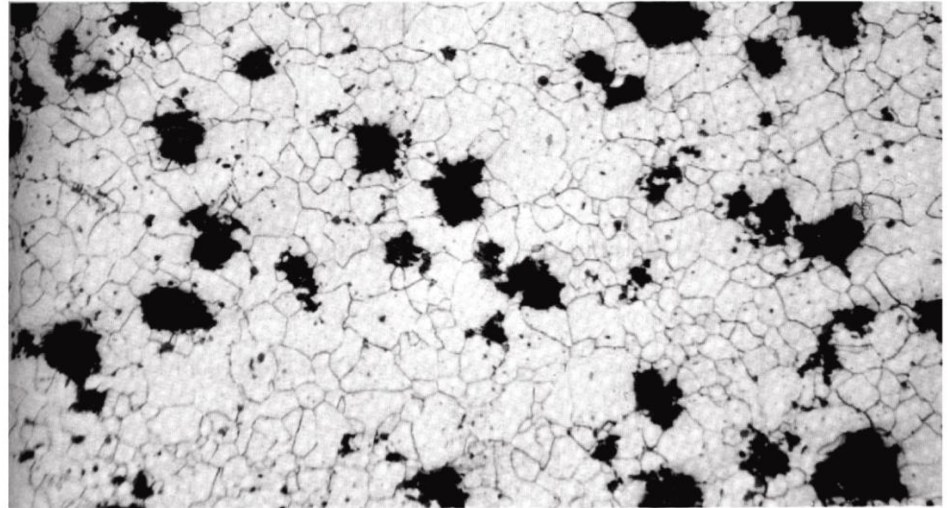
Figure 11.1

Typical microstructures of (a) white iron (400×), eutectic carbide (light constituent) plus pearlite (dark constituent); (b) gray iron (100×), graphite flakes in a matrix of 20% free ferrite (light constituent) and 80% pearlite (dark constituent).

Introduction to Materials Science for Engineers, Sixth Edition by James F. Shackelford.
ISBN 0-13-1-42486-6.



(c)



(d)

Figure 11.1

(c) ductile iron (100×), graphite nodules (spherulites) encased in envelopes of free ferrite, all in a matrix of pearlite; and (d) malleable iron (100×), graphite nodules in a matrix of ferrite. (From Metals Handbook, *9th ed., Vol. 1, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1978.)*

Tabla 12.5 Designación, propiedades mecánicas mínimas, composiciones aproximadas y aplicaciones típicas de varias fundiciones grises, dúctiles y maleables.

Grado	*Número UNS*	*Composición (% en peso)*[a]			*Estructura de la matriz*	*Propiedades mecánicas*			*Aplicaciones más corrientes*
		C	*Si*	*Otros*		*Resistencia a la tracción* [psi × 10^3 (MPa)]	*Límite elástico* [psi × 10^3 (MPa)]	*Ductilidad* (% *EL* en 2 pulg.)	
Fundición gris									
SAE G2500	F10005	3,3	2,2	0,7Mn	Perlita + ferrita	25(173)	—	—	Bloque de motores, tambores de freno
SAE G4000	F10008	3,2	2,0	0,8Mn	Perlita + ferrita	40(276)	—	—	Cilindros y pistones de motores
Fundición dúctil (esferoidal)									
ASTM A536 60-40-18	F32800	3,5-3,8	2,0-2,8	0,05Mg <0,20Ni <0,10Mo	Ferrita	60(144)	40(276)	18	Válvulas y cuerpos de bombas
100-70-03	F34800	3,5-3,8	2,0-2,8	0,05Mg <0,20Ni <0,10Mo	Perlita	100(690)	70(483)	3	Engranajes de alta resistencia
120-90-02	F36200	3,5-3,8	2,0-2,8	0,05Mg <0,20Ni <0,10Mo	Martensita templada	120(828)	90(621)	2	Engranajes y rodillos
Fundición maleable									
32510	F22200	2,3-2,7	1,0-1,75	<0,55Mn	Ferrita	50(345)	32(224)	10	Aplicaciones generales de ingeniería a temperaturas ambiente y elevadas
45006		2,4-2,7	1,25-1,55	<0,55Mn	Ferrita + perlita	65(448)	45(310)	6	Aplicaciones generales de ingeniería a temperaturas ambiente y elevadas

METALES NO FERROSOS

Se pueden clasificar de acuerdo a su densidad:
Pesados: densidad mayor a 5kg/dm ^{3} - Estaño, Cobre, Plomo, Cromo, Niquel, otros
Ligeros: densidad entre 2 y 5 Kg/dm ^{3} - Aluminio y titanio
Ultraligeros: densidad menor de 2kg/dm ^{3} - Magnesio y Berilio

Resistencia especifica

Resistencia / Densidad

Metal	Resistencia especifica (in)
Aluminio	$8.6 X 10^{5}$
Cobre	$4.7 X 10^{5}$
Magnesio	$8.7 X 10^{5}$
Niquel	$5.6 X 10^{5}$
Titanio	$9.8 X 10^{5}$
Zinc	$2.9 X 10^{5}$
Acero	$7.0 X 10^{5}$
Plomo	$0.2 X 10^{5}$

Aleaciones no Férreas.-

— Aceros y fundiciones
- propiedades mecánicas altas
- materiales pesados (densidades altas)
- baja resistencia a corrosión

— Aleaciones no férreas: tratan de mejorar alguna de las deficiencias de los aceros.

— Tendencia actual: Mayor resistencia en cualquier condición

— Mecanismos de endurecimiento: ↓

mayor o menor facilidad para bloquear el movimiento de las dislocaciones

↓

Aumento de Resistencia

Aleaciones no Férreas.-

— Aceros y fundiciones
- propiedades mecánicas altas
- materiales pesados (densidades altas)
- baja resistencia a corrosión

— Aleaciones no férreas: tratan de mejorar alguna de las deficiencias de los aceros.

— Tendencia actual: Mayor resistencia en cualquier condición

— Mecanismos de endurecimiento: ↓

mayor o menor facilidad para bloquear el movimiento de las dislocaciones

↓

Aumento de Resistencia

Family	Principal alloying element	Solid solubility (at %)[a]	UNS numbers[b]
Coppers, high-copper alloys	[c]		C10000
Brasses	Zn	37	C20000, C30000, C40000, C66400–C69800
Phosphor bronzes	Sn	9	C50000
Aluminum bronzes	Al	19	C60600–C64200
Silicon bronzes	Si	8	C64700–C66100
Copper nickels, nickel silvers	Ni	100	C70000

Source: *Metals Handbook*, 9th ed., Vol. 2, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1979.

[a] At 20°C (68°F).

[b] Wrought alloys.

[c] Various elements having less than 8 at % solid solubility at 20°C (68°F).

Table 11.9

Classification of Copper and Copper Alloys.

Family	Principal alloying element	Solid solubility (at %)[a]	UNS numbers[b]
Coppers, high-copper alloys	[c]		C10000
Brasses	Zn	37	C20000, C30000, C40000, C66400–C69800
Phosphor bronzes	Sn	9	C50000
Aluminum bronzes	Al	19	C60600–C64200
Silicon bronzes	Si	8	C64700–C66100
Copper nickels, nickel silvers	Ni	100	C70000

Source: *Metals Handbook*, 9th ed., Vol. 2, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1979.

[a] At 20° C (68° F).

[b] Wrought alloys.

[c] Various elements having less than 8 at % solid solubility at 20° C (68° F).

Table 11.9

Classification of Copper and Copper Alloys.

ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

Tienen baja densidad (2.7 g/cm^3), elevada conductividad eléctrica y térmica y buena resistencia a la corrosión en algunos ambientes. El Al tiene una estructura FCC, tiene alta ductilidad. Tiene una temperatura de fusión baja: 660°C.

Se pueden elevar sus propiedades mecánicas por medio de un TT, por ejemplo la precipitación del $MgZn_2$

Los principales elementos aleantes del aluminio son los siguientes (se enumeran las ventajas que proporcionan):

- **1. Hierro (Fe). Incrementa la resistencia mecánica**
- **2. Silicio (Si) Combinado con magnesio (Mg), aumentan la resistencia mecánica.**
- **3. Cobre (Cu) Incrementa las propiedades mecánicas pero reduce la resistencia a la corrosión.**
- **4. Manganeso (Mn) Incrementa las propiedades mecánicas y reduce la calidad de embutición.**
- **5. Magnesio (Mg) Tiene alta resistencia tras el conformado en frío**
- **6. Cromo (Cr) Aumenta la resistencia mecánica cuando está combinado con otros elementos Cu, Mn, Mg.**
- **7. Titanio (Ti) Aumenta la resistencia mecánica**
- **8. Zinc (Zn) Reduce la resistencia a la corrosión**

Numerals	Major alloying element(s)
1XXX	None ($\geq$ 99.00% Al)
2XXX	Cu
3XXX	Mn
4XXX	Si
5XXX	Mg
6XXX	Mg and Si
7XXX	Zn
8XXX	Other elements

Source: Data from *Metals Handbook*, 9th ed., Vol. 2, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1979.

Table 11.7

Alloy Designation System for Aluminum Alloys.

Los grupos 2xxx, 6xxx y 7xxx son endurecibles por precipitación.

F: Tal como se fabrico

O: Recocido y recristalizado

H: Endurecido por deformación

T: Tratada térmicamente

Designación de estados de tratamiento de aleaciones de Aluminio

F: Tal y como fue fabricada
O: Recocido (en el estado mas blando posible)
H Representa endurecido por deformación
H1: Trabajo en frío o acritud
H2 : Trabajo en frío y recocido parcial
H3: Endurecido por deformación o acritud y estabilizado a evita una temperatura a una temperatura baja para evitar endurecimiento por envejecimiento
T Representa tratado térmicamente
T1: Enfriada desde temperatura de fabricación y envejecida naturalmente
T2: Enfriada desde temperatura de fabricación, trabajo en frío y envejecida naturalmente
T3: Trat. Térmico de solubilización, trabajo en frío y envejecimiento natural
T4: Trat. Térmico de solubilización y envejecimiento natural
T5: Enfriada desde temperatura de fabricación y envejecida artificialmente
T6: Trat. Térmico de solubilización y envejecimiento artificialmente
T7: Trat. Térmico de solubilización y sobremaduración/estabilización
T8: Trat. Térmico de solubilización, trabajo en frío y envejecimiento artificial.
T9: Trat. Por solución, envejecida artificialmente y trabajo en frío
T10: Enfriada desde temperatura de fabricación, trabajo en frío y envejecida artificialmente

Designación de estados de tratamiento de aleaciones de Aluminio

Tabla 12.7 Composiciones, propiedades mecánicas y aplicaciones típicas de ocho aleaciones de aluminio comunes

Número de la Aluminum Association	Número UNS	Composición (% en peso)[a]				Condición	Propiedades mecánicas			Aplicaciones típicas
		Cu	Mg	Mn	Otros		Resistencia a la tracción [psi × 10^3 (MPa)]	Límite elástico [psi × 10^3 (MPa)]	Ductilidad (% EL en 2 pulg.)	
Aleaciones hechurables no tratables térmicamente										
1100	A91100	0,12				Recocido	13 (90)	5 (34)	35	Planchistería
3003	A93003	0,12		1,2		Recocido	16 (110)	6 (42)	30	Utensilios cocina
5052	A95052		2,5		0,25 Cr	Recocido	28 (195)	13 (90)	25	Partes de autocares y camiones
Aleaciones hechurables tratables térmicamente										
2014	A92014	4,4	0,5	0,8	0,8Si	Tratamiento térmico	70 (485)	60 (415)	13	Estructuras generales
6061	A96061	0,3	1,0		0,6Si, 0,2Cr	Tratamiento térmico	45 (310)	40 (275)	12	Camiones, torres, muebles
7075	A97075	1,6	2,5		5,6Zn, 0,23Cr	Tratamiento térmico	83 (580)	73 (505)	11	Partes estructurales de aviones
Aleaciones moldeables tratables térmicamente										
295,0	A02950	4,5			1,1Si	Tratamiento térmico	36 (250)	24 (165)	5	Cárter de motores, ruedas de avión
356,0	A03560		0,3		7,0Si	Tratamiento térmico	33 (230)	24 (165)	4	Bloques de cilindros enfriados por agua

[a] La composición se completa con aluminio

Fuente: Adaptada de *Metals Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals,* Vol. 2, 9th edition, H. Baker, Managing Editor, American Society for Metals, 1979.

La aleación 2024 con 4.5% de Cu, 1.5 % de Mg y 0.6 % de Si pueden formar el precipitado Al2CuMg y en condición T6 alcanza una resistencia de 440MPa, se usa en estructuras de aviones.

La aleación 6061 con 1% de Mg , 0.6% de Si y en estado T6 alcanza 280 MPa.

La aleación 7075 con 5.6 % de Zn, 2.5% de Mg y 0.25% de Cr y en estado T6 alcanza a 500 MPa., uso en aeronática.

TITANIO Y SUS ALEACIONES

Tiene una transformación alotrópica a los 882° C. Se produce del rutilo

A **alta Temperatura: Fase Beta (BCC) y a baja temperatura: Fase alfa (HCP)**

Densidad baja: 4.5 g/cm^3, temperatura de fusión: 1668°C, tienen buenas propiedades mecánicas . El titanio tiene una alta reactividad a altas temperaturas. Muy aplicados en la industria naval, de aviones, petroquímica, biomaterial, otros.

Buena resistencia a la corrosión: ambiente atmosférico, marino, y variedad de industriales. Una película de TiO2 proporciona por debajo de los 535°C excelente resistencia a la corrosión y a la contaminación. Por arriba de esa temperatura la película de TiO2 se desintegra y fragiliza al titanio.

Tiene bajo calor especifico y baja conductividad térmica.

Es muy reactivo con otros elementos a elevada temperatura

El titanio puro se utiliza en intercambiadores de calor, tuberías, reactores, bombas y válvulas para las industrias químicas y petroquímicas

Material	Resistencia a la tensión (psi)	Esfuerzo de cedencia (psi)	% de elongación	Mecanismo de endurecimiento	Aplicaciones
Ni puro (99.9% Ni)	50,000	16,000	45	Recocido	Resistencia a la corrosión
	95,000	90,000	4	Trabajo en frío	Resistencia a la corrosión
Aleaciones Ni Cu:					
Monel 400 (Ni-31.5% Cu)	78,000	39,000	37	Recocido	Válvulas ,bombas, intercambiadores de calor
Monel K - 500 (Ni-29% Cu-2.7% Al-0.6% Ti)	150,000	110,000	30	Envejecido	Flechas, resortes, impulsores
Superaleaciones Ni:					
Inconel 600 (Ni-15.5% Cr-8% Fe)	90,000	29,000	49	Carburos	Equipo de tratamiento térmico
Hastelloy B-2 (Ni-28% Mo)	130,000	60,000	61	Carburos	Resistencia a la corrosión
DS-Ni (Ni-2% ThO_2)	71,000	48,000	14	Dispersión	Turbinas de gas
Fe-Ni superaleaciones:					
Incoly 800 (Ni-46% Fe-21% Cr)	89,000	41,000	37	Carburos	Intercambiadores de calor
Co superaleaciones:					
Stelly 6B (60% Co-30% Cr-4.5% W)	177,000	103,000	4	Carburos	Resistencia al desgaste abrasivo

El silicio y el oxigeno son el 75% de los elementos presentes en la corteza terrestres. Silicatos basados en SiO_2

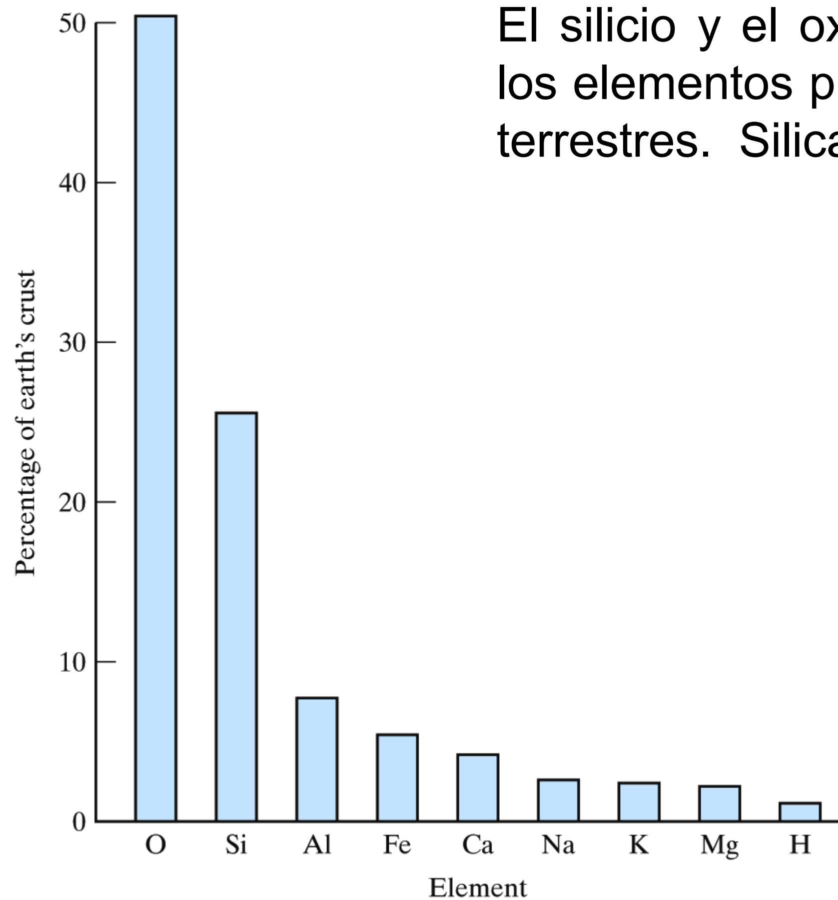


Figure 12.1

The relative abundance of elements in the earth's crust illustrates the availability of ceramic minerals, especially the silicates.

MATERIALES CERÁMICOS

Los materiales cerámicos son materiales inorgánicos no metálicos, constituidos por elementos metálicos y no metálicos enlazados principalmente mediante enlaces iónicos y /o covalentes.

Material	*Percent Ionic Character*
CaF_2	89
MgO	73
NaCl	67
Al_2O_3	63
SiO_2	51
Si_3N_4	30
ZnS	18
SiC	12

$$\%\ \text{ionic character} = \{1 - \exp[-(0.25)(X_A - X_B)^2]\} \times 100$$

X_A y X_B son las electronegatividades de los elementos presentes

	Composition (wt %)					
Ceramic	**SiO_2**	**Al_2O_3**	**K_2O**	**MgO**	**CaO**	**Others**
Silica refractory	96					4
Fireclay refractory	50–70	45–25				5
Mullite refractory	28	72				—
Electrical porcelain	61	32	6			1
Steatite porcelain	64	5		30		1
Portland cement	25	9			64	2

[a] These are approximate compositions, indicating primary components. Impurity levels can vary significantly from product to product.

Table 12.1

Compositions[a] *of Some Silicate Ceramics.*

REFRACTARIOS

TABLA 14-5 Composiciones de refractarios típicos (porcentaje en peso)

Refractario	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Fe_2O_3	Cr_2O_3
Ácidos					
Sílice	95-97				
Ladrillo refractario de alta resistencia	51-53	43-44			
Ladrillo refractario de alta alúmina	10-45	50-80			
Básicos					
Magnesita			83-93	2-7	
Olivina	43		57		
Neutros					
Cromita	3-13	12-30	10-20	12-25	30-50
Cromita-magnesita	2-8	20-24	30-39	9-12	30-50

De *Ceramic Data Book*, Cahners Publishing Co. 1982.

(PERICLASA)
son costosos

Con bajos contenidos de alúmina se reduce la temp. de fusión. Con altos contenidos se aumenta la temp. de fusión.

Resistencia en entornos básicos

Table 13.2 Compositions of Five Common Ceramic Refractory Materials

Refractory Type	*Composition (wt%)* Al_2O_3	SiO_2	MgO	Cr_2O_3	Fe_2O_3	CaO	TiO_2	*Apparent Porosity (%)*
Fireclay	25–45	70–50	0–1		0–1	0–1	1–2	10–25
High-alumina fireclay	90–50	10–45	0–1		0–1	0–1	1–4	18–25
Silica	0.2	96.3	0.6			2.2		25
Periclase	1.0	3.0	90.0	0.3	3.0	2.5		22
Periclase–chrome ore	9.0	5.0	73.0	8.2	2.0	2.2		21

Source: From W. D. Kingery, H. K. Bowen, and D. R. Uhlmann, *Introduction to Ceramics,* 2nd edition. Copyright © 1976 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.

QUE SON CERAMICAS DE INGENIERÍA ?

Son compuestos puros o casi puros: Óxidos, Nitruros, Carburos, etc.

Primary composition[a]	Common product names
Al_2O_3	Alumina, alumina refractory
MgO	Magnesia, magnesia refractory, magnesite refractory, periclase refractory
$MgAl_2O_4$ ($= MgO \cdot Al_2O_3$)	Spinel
BeO	Beryllia
ThO_2	Thoria
UO_2	Uranium dioxide
ZrO_2 (stabilized[b] with CaO)	Stabilized (or partially stabilized) zirconia
$BaTiO_3$	Barium titanate
$NiFe_2O_4$	Nickel ferrite

[a] Some products, such as the industrial refractories, may have several weight percent oxide additions and impurities.

[b] Pure ZrO_2 has a phase transformation at 1,000°C in which the crystal structure change produces a catastrophic volume change. The material is literally reduced to a powder. A 10 wt % CaO addition produces a cubic crystal structure stable to the melting point (~ 2,500°C), making "stabilized" zirconia a highly useful refractory. Figure 9.30 illustrated this point with the $CaO-ZrO_2$ phase diagram. Lesser CaO additions can produce a two-phase microstructure, with cubic zirconia being one of the phases. This "partially stabilized" zirconia even has superior mechanical properties, as discussed in Section 8.2.

Table 12.2

Some Nonsilicate Oxide Ceramics.

Primary composition[a]	Common product names
SiC	Silicon carbide
Si_3N_4	Silicon nitride
TiC	Titanium carbide
TaC	Tantalum carbide
WC	Tungsten carbide
B_4C	Boron carbide
BN	Boron nitride
C	Graphite

[a]Some products may have several weight percent additions or impurities.

Table 12.3

Some Nonoxide Ceramics.

TABLA 14-4 Propiedades mecánicas de cerámicos avanzados seleccionados

Material	Densidad (g/m^3)	Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia a la flexión (psi)	Resistencia a la compresión (psi)	Módulo de Young (psi)	Tenacidad a la fractura (psi $\sqrt{plg}$)
Al_2O_3	3.98	30,000	80,000	400,000	56×10^6	5,000
SiC (sinterizado)	3.1	25,000	80,000	560,000	60×10^6	4,000
Si_3N_4 (unión por reacción)	2.5	20,000	35,000	150,000	30×10^6	3,000
Si_3N_4 (comprimido en caliente)	3.2	80,000	130,000	500,000	45×10^6	5,000
Sialón Si, Al, O, N	3.24	60,000	140,000	500,000	45×10^6	9,000
ZrO_2 (parcialmente estabilizado)	5.8	65,000	100,000	270,000	30×10^6	10,000
ZrO_2 (tenacidad mejorada por transformación)	5.8	50,000	115,000	250,000	29×10^6	11,000

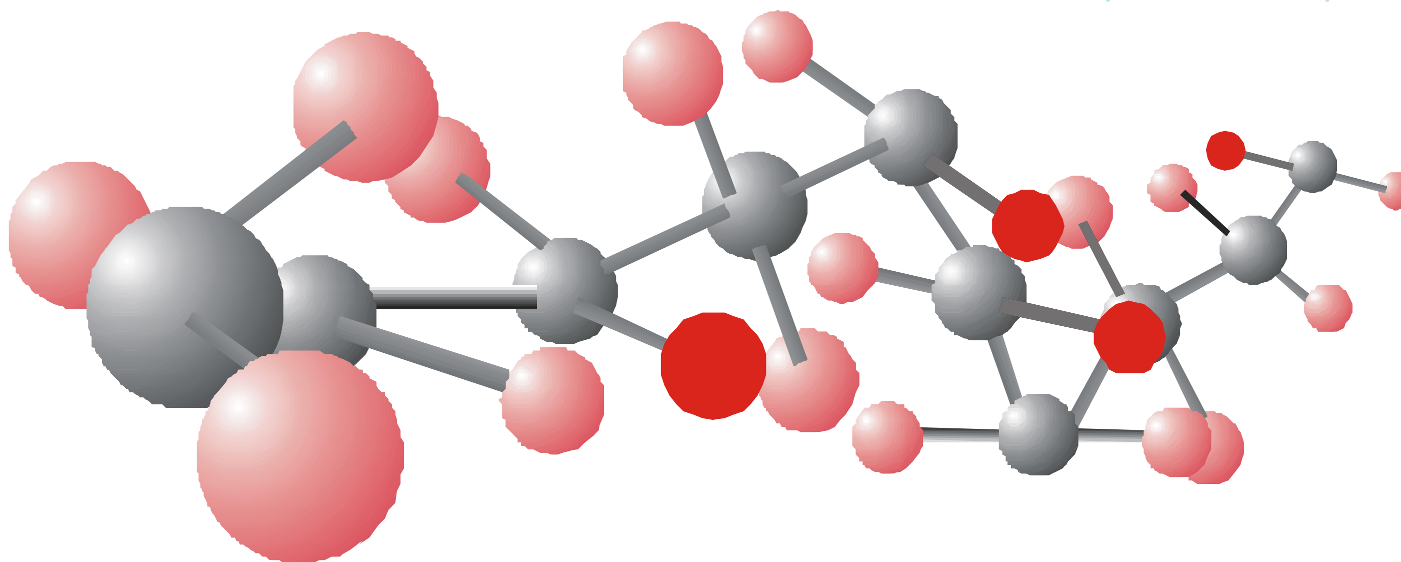
POLÍMEROS: MACROMOLECULAS

Polímero: Poli: Muchos ; mero: unidad

<u>Secuencia Continua (Cadenas)</u> formadas por la unión <u>covalente</u> de varias unidades <u>monoméricas</u>.

MUCHAS PARTES ENLAZADAS QUÍMICAMENTE Y QUE FORMAN UN SÓLIDO. MOLÉCULAS LINEALES O RAMIFICADAS, FORMADAS POR UNA REPETICIÓN INDEFINIDA DE
GRUPOS FUNCIONALES SIMPLES (MONOMEROS) QUE SE COMPONEN BÁSICAMENTE DE C, H, O, N, ENTRE OTROS. TAMBIEN ESTAN UNIDOS CON GRUPOS LATERALES DE DIFERENTES ATOMOS (O, Cl, etc), O GRUPOS ORGANICOS.

LA POLIMERIZAZACIÓN ES UNA REACCIÓN QUÍMICA MEDIANTE LA CUAL UN CONJUNTO DE MOLÉCULAS DE BAJO PESO MOLECULAR (MONOMEROS) SE UNEN QUÍMICAMENTE PARA FORMAR UNA MOLÉCULA DE GRAN PESO MOLECULAR (POLÍMERO)



Naturales: **Se obtienen de plantas y animales: albúmina, celulosa, gelatina, almidón, madera, caucho, proteínas, lana, algodón, entre otros.**

Sintéticos: **Se utilizan pequeñas moléculas orgánicas-ácido poli-láctico, ácido poli-láctico-co-glicólico, poli-metilmeta-acrilato, poli-isobutilcianoacrilato, entre otros.**

Clasificación Por su COMPORTAMIENTO TÉRMICO

(Termoplásticos, Termoestables y elastómeros)

TERMOPLÁSTICOS

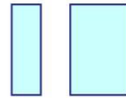
- Por calentamiento se vuelven deformables y adquieren un estado líquido viscoso.
- Al enfriar vuelven a ser solubles. Al volver a calentar, vuelven a ser fusibles..
- Poseen una estructura sin entrecruzamientos..

TERMOESTABLES

- Estructura altamente entrecruzada.
- Cuando se calientan no se funden, sino que se descomponen químicamente.
- No son solubles.

ELASTÓMEROS

- Tg<Ambiente
- Ligeramente entrecruzados física o químicamente.
- Polímeros altamente elásticos

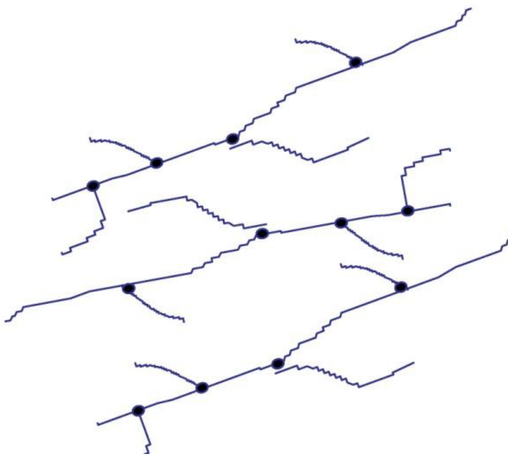


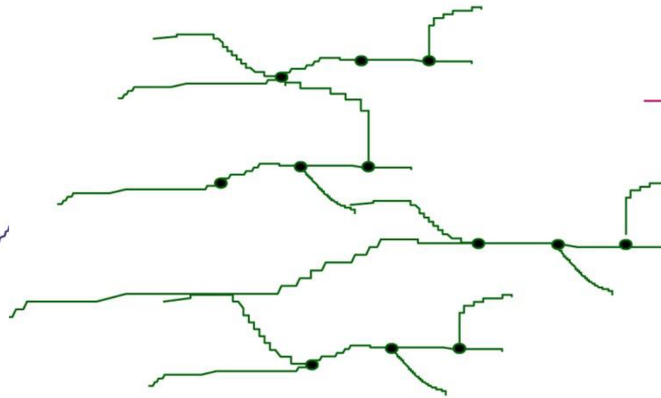
Grado de entrecruzamiento

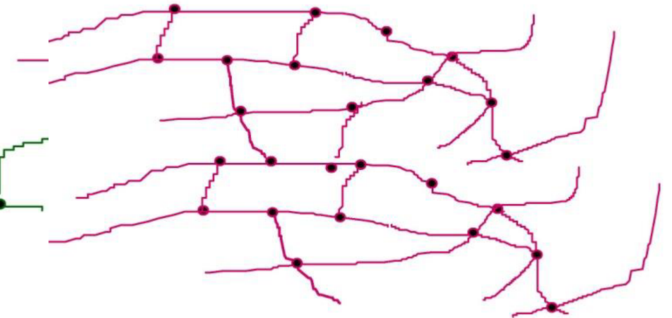
Termoplásticos

Elastómeros

Termoestables







Cadenas lineales independientes

Cadenas lineales poco entrecruzadas

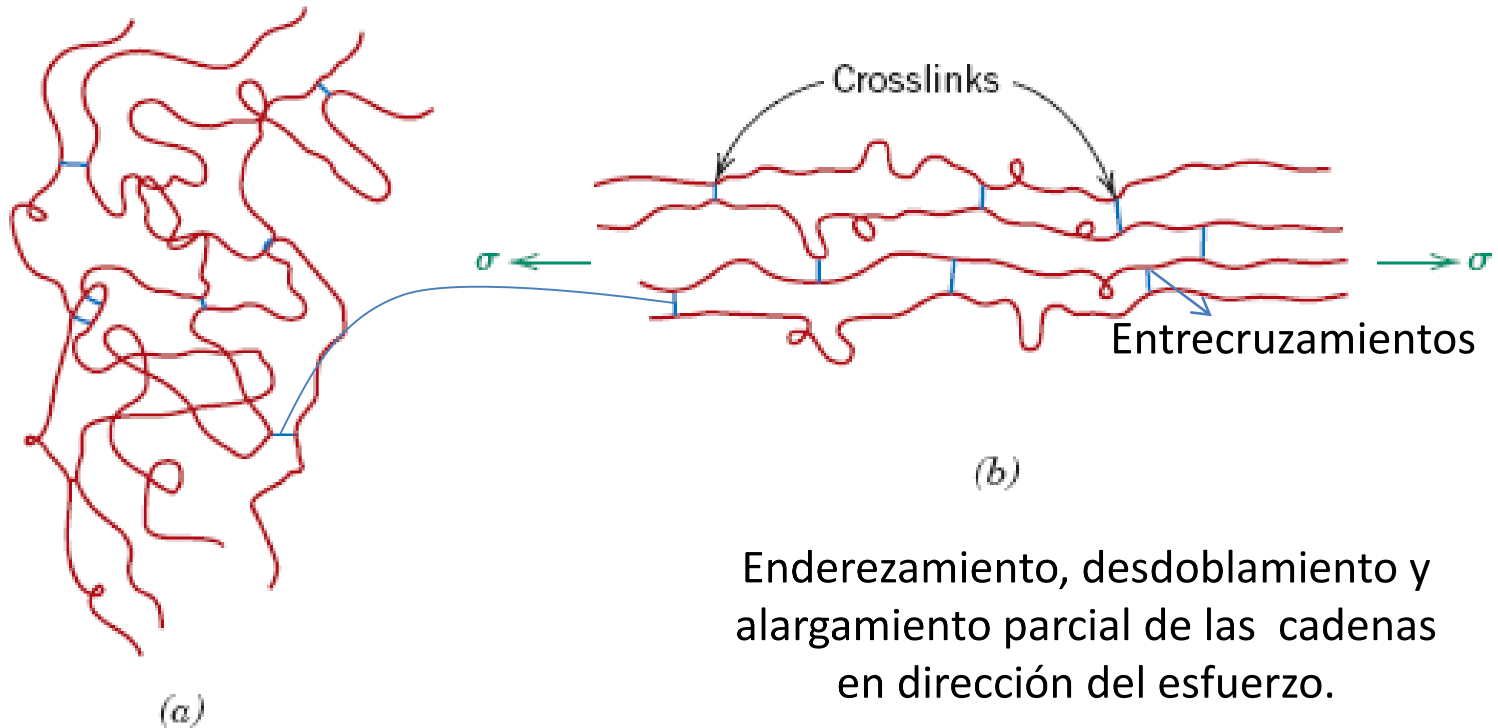
redes muy intrecruzadas

Entrecruzamiento

ELASTOMEROS

COMPORTAMIENTO ELASTICO: EXPERIMENTAN GRANDES DEFORMACIONES Y LUEGO SE RECUPERAN ELASTICAMENTE.

EL ENTRECRUZAMIENTO GENERA FUERZAS PARA REGRESAR A SU ESTADO ORIGINAL



Enderezamiento, desdoblamiento y alargamiento parcial de las cadenas en dirección del esfuerzo.

Moléculas entrecruzadas muy enredadas, dobladas y plegadas. La entropía es mayor

Son termoestables

MATERIALES COMPUESTOS SINERGIA EN LOS MATERIALES

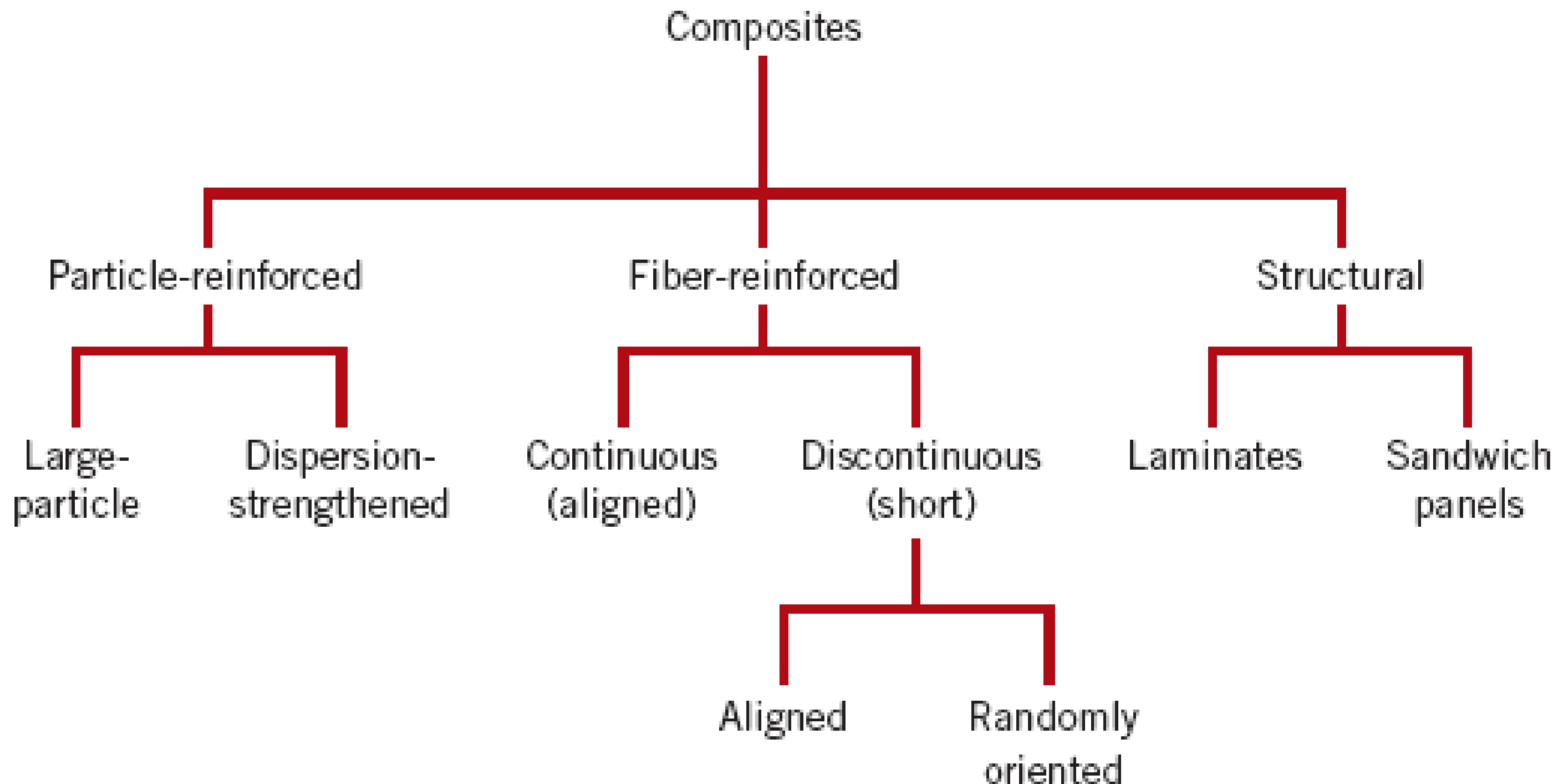
Existen diferentes definiciones

Una de las mas usadas: Es un sistema de materiales formado por una mezcla o combinación debidamente dispuestas de dos o mas micro o macroconstuyentes con una entercara que los separa, que difieren en forma y composición química y son insolubles entre si.

Son una mezcla de materiales donde sus constituyentes conservan su identidad química

Se forman cuando dos o mas materiales o FASES se utilizan juntos para dar una combinación de propiedades que no se pueden lograr de otra manera:
rigidez, peso, desempeño a alta temperatura, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad.

CLASIFICACIÓN



CERMET

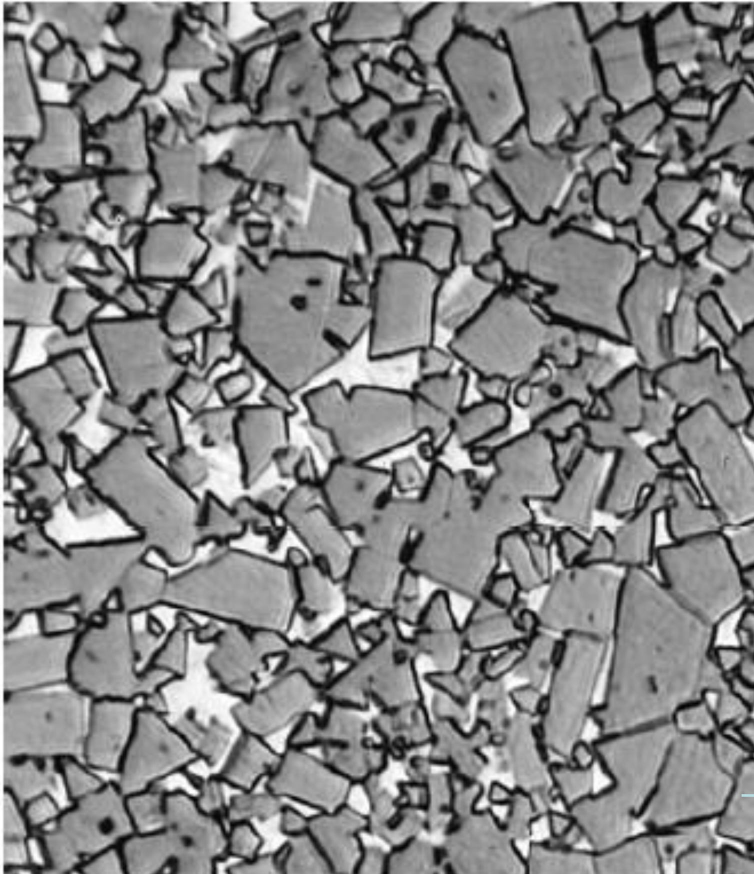


Figure 16.4 Photomicrograph of a WC–Co cemented carbide. Light areas are the cobalt matrix; dark regions, the particles of tungsten carbide. 100×. (Courtesy of Carboloy Systems Department, General Electric Company.)

90%

CAUCHO REFORZADO CON PARTICULAS DE CARBONO

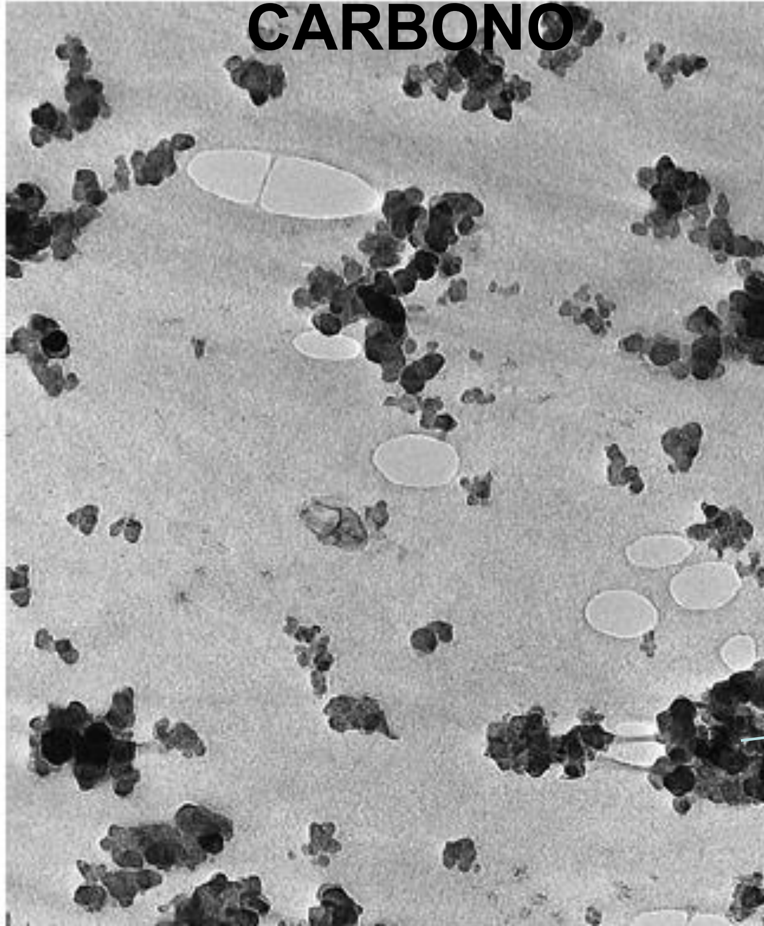


Figure 16.5 Electron micrograph showing the spherical reinforcing carbon black particles in a synthetic rubber tire tread compound. The areas resembling water marks are tiny air pockets in the rubber. 80,000×. (Courtesy of Goodyear Tire & Rubber Company.)

Partículas de negro de humo 15-30%
Se aumenta la tenacidad, la resistencia a la abrasión y a la tracción.

NEUMATICOS

ALEACIÓN DE Al CON PARTICULAS DE SiC

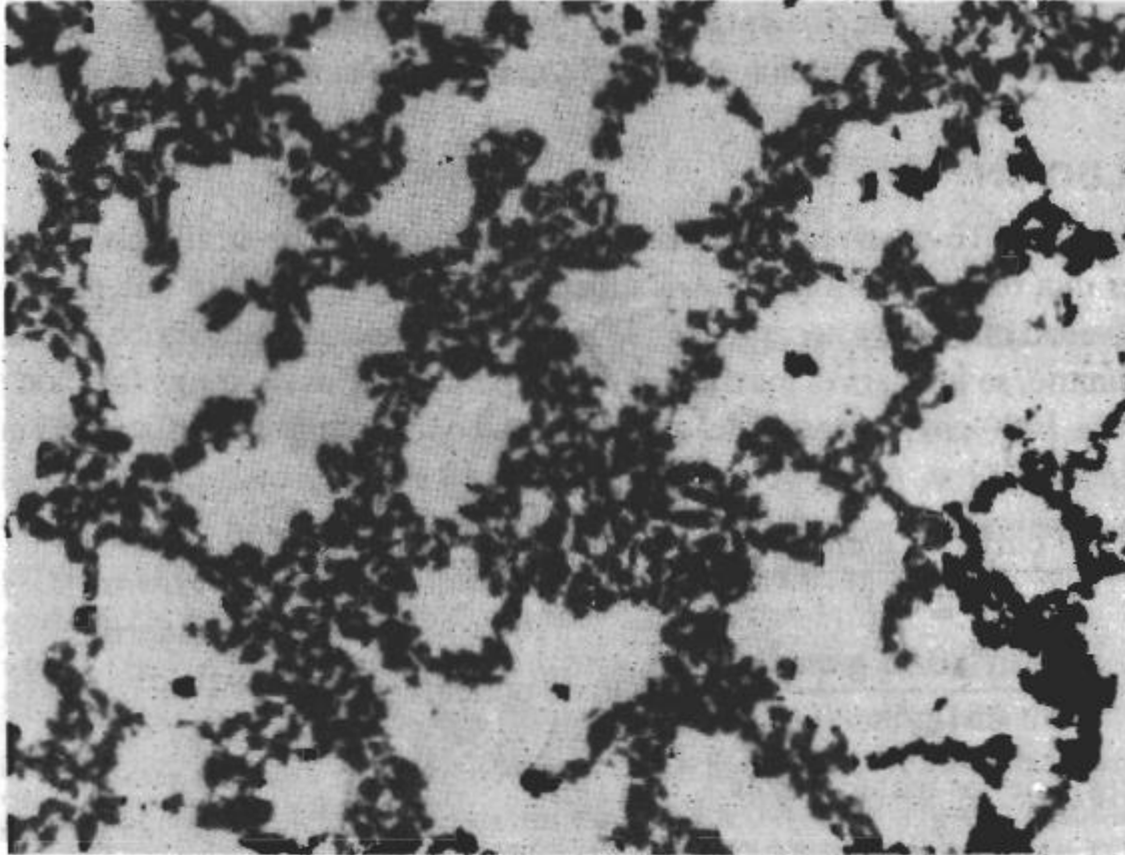
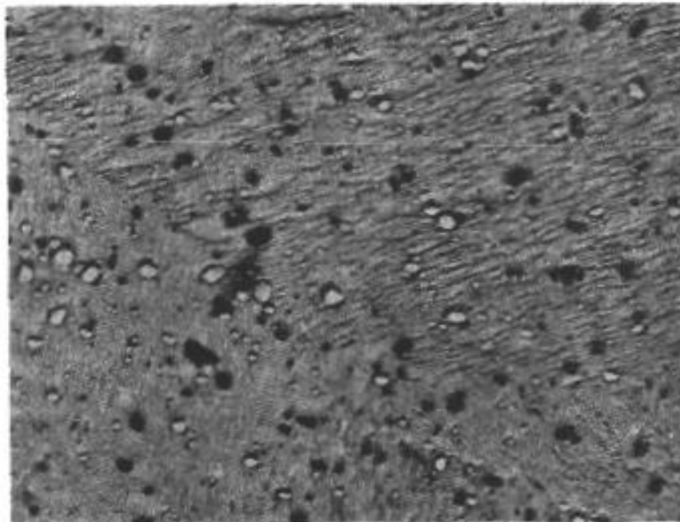


FIGURA 16-7 Microestructura de una aleación de fundición de aluminio reforzada con partículas de carburo de silicio. En este caso, las partículas de refuerzo se han segregado a las regiones interdendríticas de la fundición (×125). (*Cortesía de David Kennedy, Lester B. Knight Cast Metals Inc.*)

APLICACIONES AUTOMOTRICES: PISTONES Y BIELAS

TABLA 16-1 Ejemplos y aplicaciones de compuestos endurecidos por dispersión

Sistema	Aplicaciones
Ag-CdO	Materiales para contactos eléctricos
$Al\text{-}Al_2O_3$	Uso posible en reactores nucleares
Be-BeO	Aerospacial y reactores nucleares
$Co\text{-}ThO_2$, Y_2O_3	Posibles materiales magnéticos resistentes a la termofluencia
Ni-20% $Cr\text{-}ThO_2$	Componentes de turborreactores
Pb-PbO	Rejillas para batería
$Pt\text{-}ThO_2$	Filamentos, componentes eléctricos
$W\text{-}ThO_2$, ZrO_2	Filamentos, calentadores



Oxido de toria
Se aumenta la resistencia a altas temperaturas

FIGURA 16-3 Micrografía electrónica del níquel TD. Las partículas dispersas de ThO_2 tienen un diámetro de 300 nm o menos (× 2000). (*De* Oxide Dispersion Strengthening, *p.714, Gordon and Breach, 1968. © AIME.*)

TABLA 16-2 Propiedades de materiales de refuerzo en fibras seleccionadas

Material	Densidad (g/cm^3)	Resistencia a la tensión (ksi)	Módulo de elasticidad ($\times 10^6$ psi)	Temperatura de fusión (°C)	Módulo específico ($\times 10^7$ plg)	Resistencia específica ($\times 10^6$ plg)
Polímeros:						
Kevlar	1.44	650	18.0	500	34.7	10.1
Nylon	1.14	120	0.4	249	1.0	2.9
Polietileno	0.97	480	25.0	147	7.1	13.7
Metales:						
Be	1.83	185	44.0	1277	77.5	2.8
Boro	2.36	500	55.0	2030	64.7	4.7
W	19.40	580	59.0	3410	8.5	0.8
Vidrio:						
Vidrio E	2.55	500	10.5	<1725	11.4	5.6
Vidrio S	2.50	650	12.6	<1725	14.0	7.2
Carbono:						
HS (alta resistencia)	1.75	820	40.0	3700	63.5	13.0
HM (alto módulo)	1.90	270	77.0	3700	112.0	3.9
Cerámicos:						
Al_2O_3	3.95	300	55.0	2015	38.8	2.1
B_4C	2.36	330	70.0	2450	82.4	3.9
SiC	3.00	570	70.0	2700	47.3	5.3
ZrO_2	4.84	300	50.0	2677	28.6	1.7
***Whiskers*:**						
Al_2O_3	3.96	3000	62.0	1982	43.4	21.0
Cr	7.20	1290	35.0	1890	13.4	4.9
Grafito	1.66	3000	102.0	3700	170.0	50.2
SiC	3.18	3000	70.0	2700	60.8	26.2
Si_3N_4	3.18	2000	55.0		47.8	17.5

Los whiskers son monocristales muy delgados, libres de defectos.

Class	Fiber/Matrix
Polymer matrix	
	Para-aramid (Kevlar[a])/epoxy
	Para-aramid (Kevlar[a])/polyester
	C (graphite)/epoxy
	C (graphite)/polyester
	C (graphite)/polyetheretherketone (PEEK)
	C (graphite)/polyphenylene sulfide (PPS)
Metal matrix	
	B/Al
	C/Al
	Al_2O_3/Al
	Al_2O_3/Mg
	SiC/Al
	SiC/Ti (alloys)
Ceramic matrix	
	Nb/$MoSi_2$
	C/C
	C/SiC
	SiC/Al_2O_3
	SiC/SiC
	SiC/Si_3N_4
	SiC/Li–Al–silicate (glass-ceramic)

Source: Data from K. K. Chawla, University of Alabama, Birmingham; A. K. Dhingra, the Du Pont Company; and A. J. Klein, ASM International.

[a]Trade name, Du Pont.

Table 14.3

Advanced Composite Systems Other Than Fiberglass.

MATERIALES COMPUESTOS ESTRUCTURALES

LAMINARES

Son capas de materiales orientados por un adhesivo orgánico.

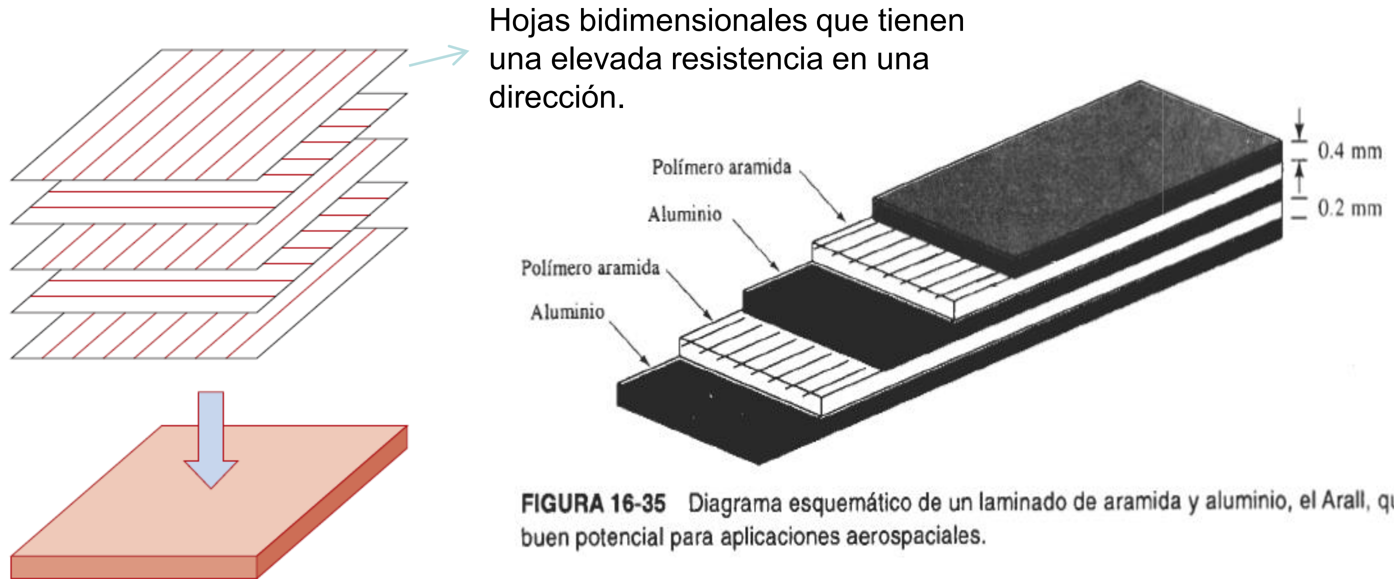


FIGURA 16-35 Diagrama esquemático de un laminado de aramida y aluminio, el Arall, que tiene buen potencial para aplicaciones aerospaciales.

PANELES SÁNDWICH

Se diseñan vigas con una alta resistencia.

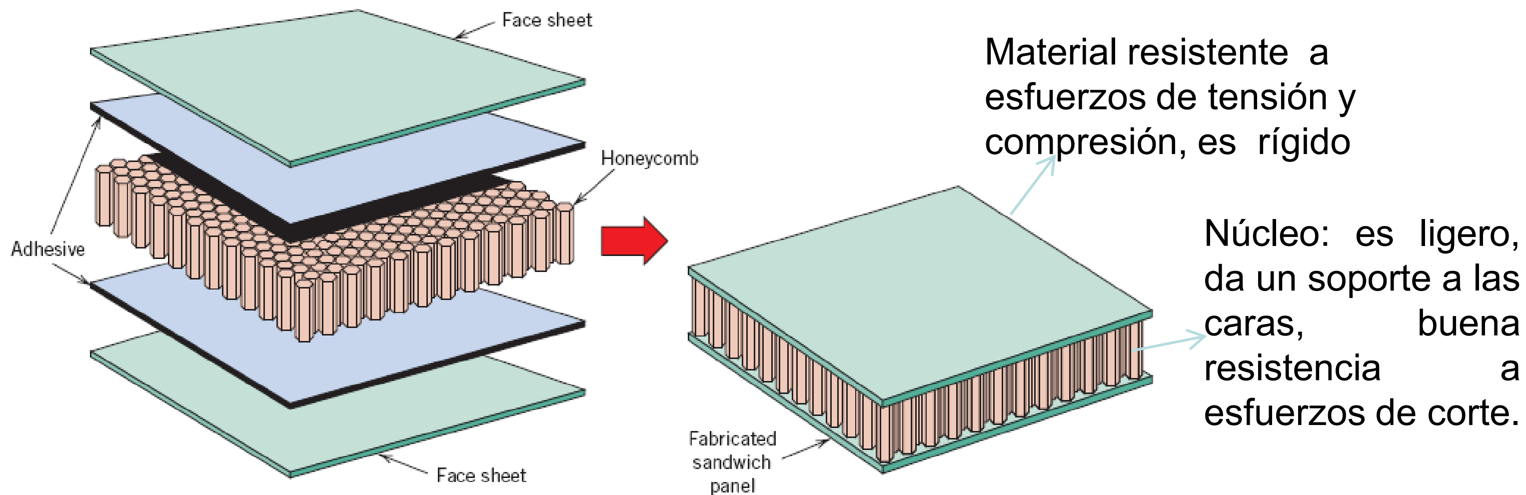
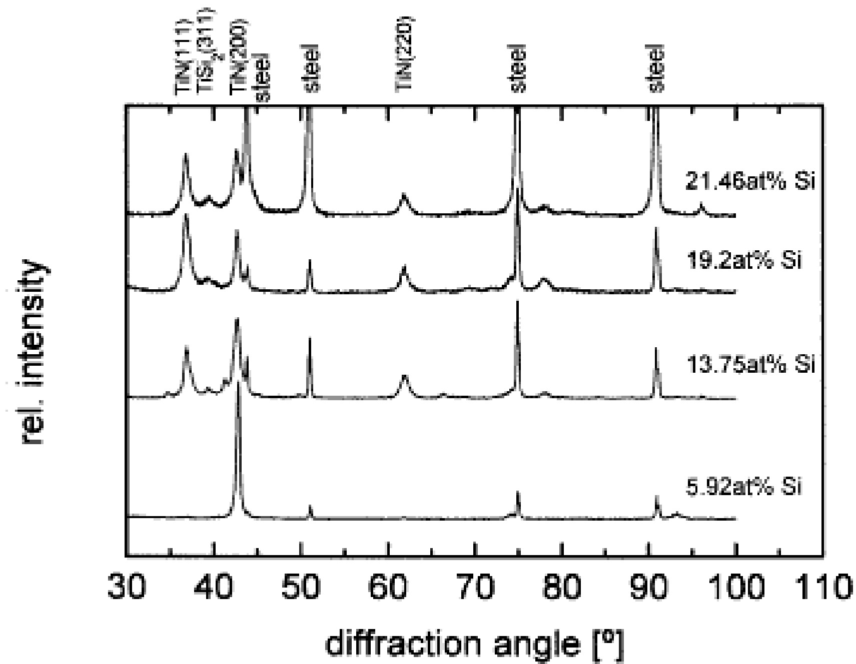
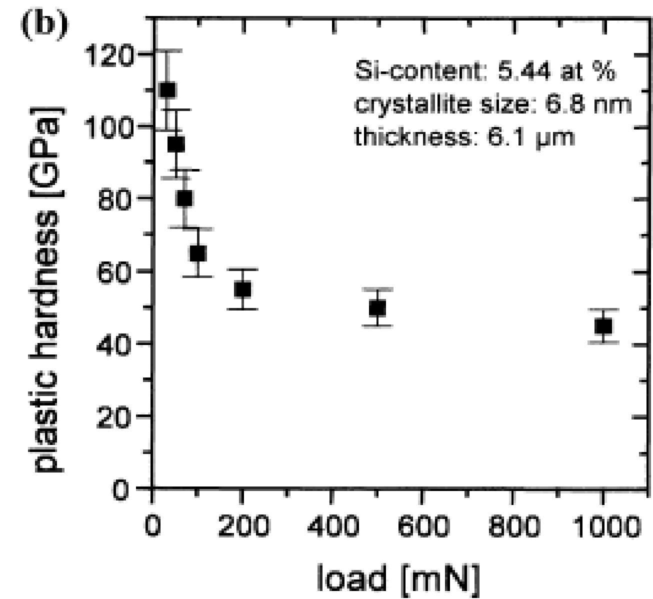
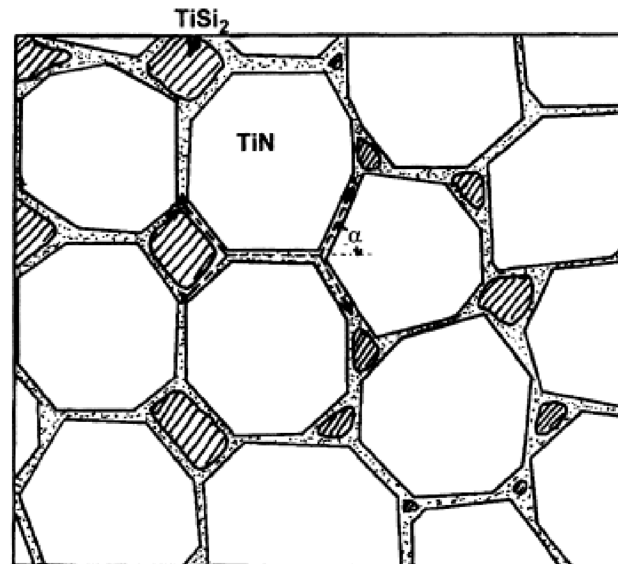


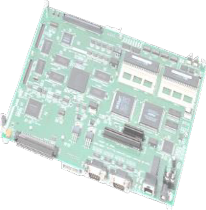
Figure 16.18 Schematic diagram showing the construction of a honeycomb core sandwich panel. (Reprinted with permission from *Engineered Materials Handbook*, Vol. 1, *Composites*, ASM International, Metals Park, OH, 1987.)

RECUBRIMIENTOS CON MATERIALES COMPUESTOS









INTERDISCIPLINARIO

1- Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
2- Departamento de Ingeniería Química
3- Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
4- Departamento de Física
5- Departamento de Química
6- Facultad de Odontología
7- Centro Internacional de Física



LINEAS DE INVESTIGACION

1. Ingeniería de superficies: AFIS, GSYNM, Física Aplicada, GMTA
2. Procesos de manufactura: AFIS
3. Mecánica estructural, optimización y modelamiento de materiales: GIBM, OptimUN, GIES, GFMC
4. Materiales Poliméricos: Física Aplicada, Procesos Químicos y Biotecnología
5. Materiales Cerámicos: Centro de catálisis heterogénea , Procesos Químicas y Biotecnologia, GSYNM, AFIS
6. Nanomateriales: GMAT, Materiales, AFIS, GFMC
7. Materiales para construcción y desarrollo sostenible: GIGUN, GIES

Maestría en Materiales y Procesos

Doctorado en Ciencia y Tecnología de Materiales

Unidad de Materiales y Procesos de Manufactura
Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de Colombia

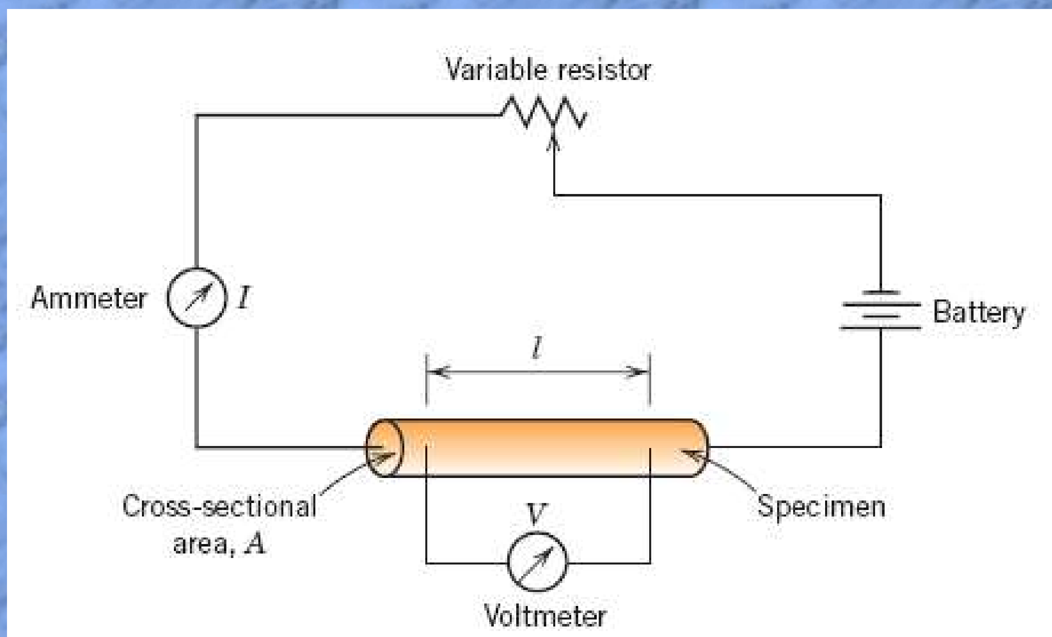
GRACIAS POR SU ATENCIÓN

BIBLIOGRAFIA

1. - Ciencia e Ingeniería de Materiales, William Smith
2. - Ciencia i. e ingeniería. de los materiales. Donald Askelan
3. - I n t r o d u c c i ó n a l a Ciencia e Ingeniería de los Materiales. W i l l ik m d C a l l i s t e r
4. Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros para, 6 ta edición, Shackelford
5. - Introducción a la Física del Estado Sólido, Charles Kittel
6. - Introducción a la Metalurgia Física. Sydney Avner
7. - Materials selection in Mechanical Desing, Michel Ashby.
8. - ASHBY, MICHAEL F. Engineering Materials 1 - An introduction to properties, applications and design. Cuarta edicion. Elsevier. 2012.
9. - Bases de datos, páginas de internet y artículos relacionados con la temática de Ciencia e Ingeniería de Materiales
10. - Notas de clase+++
11. Ciencia e Ingeniería de los materiales, J.M Montes
12. Google

PROPIEDADES ELECTRICAS

CONDUCCIÓN ELÉCTRICA



METALES : 10 ^{7} $(\Omega\text{-m})^{-1}$

AISLANTES: 10^{-10} a 10^{-20} $(\Omega\text{-m})^{-1}$

SEMICONDUCTORES : 10^{-6} a 10^{4} $(\Omega\text{-m})^{-1}$

CONNDUCTORES : 10 ^{3} $(\Omega\text{-cm})^{-1}$

AISLANTES: menores a 10^{-12} $(\Omega\text{-cm})^{-1}$

SEMICONDUCTORES : 10^{-12} a 10^{3} $(\Omega\text{-cm})^{-1}$

$$V = IR$$

Voltios (J/C)
Ohmios (V/A)
Amperios (C/s)

Ley de ohm

La magnitud de la resistencia depende de las dimensiones del resistor.

$$\rho = \frac{RA}{l}$$

Resistividad

l es la distancia entre los puntos en que se mide el voltaje y A es el área de la sección perpendicular a la dirección de la corriente.
Unidades: Ω-m

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

$(\Omega\text{-m})^{-1}$

Representa la capacidad con que un material es capaz de conducir una corriente eléctrica.

Conductividad eléctrica

La conductividad no depende de las dimensiones del material.

$$J = \sigma \mathscr{E}$$

$$\mathscr{E} = \frac{V}{l}$$

J es la densidad de corriente (I/A) y $\mathscr{E}$ es la intensidad del campo electrico, es decir, la diferencia de voltaje entre dos puntos dividido por esa distancia que los separa

ESTRUCTURA DE BANDAS DE ENERGÍA DE LOS SÓLIDOS

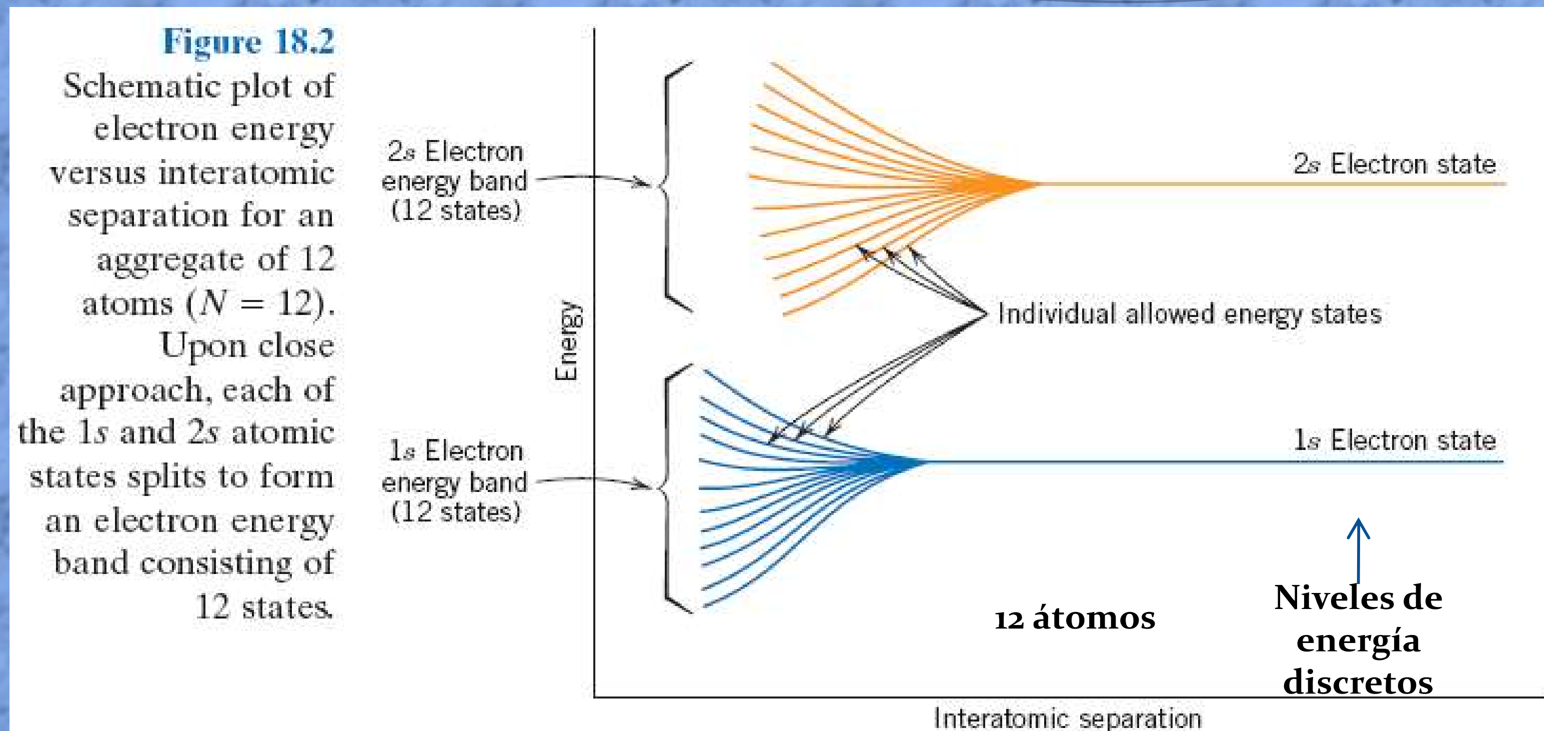


Figure 18.2 Schematic plot of electron energy versus interatomic separation for an aggregate of 12 atoms ($N = 12$). Upon close approach, each of the 1*s* and 2*s* atomic states splits to form an electron energy band consisting of 12 states.

Cuando se unen los 12 átomos, es decir la distancia interatómica, los niveles 1s y 2s de los 12 átomos se dividen para formar una banda electrónica de 12 estados.

Los niveles de energía se dividen para formar nuevos niveles de energía.

Los orbitales que contienen los electrones de valencia de un átomo interactúan primero con los orbitales que contienen los electrones de valencia del otro átomo.

Con el aumento del numero de átomos, también se aumenta el número de niveles de energía.

Los niveles de energía se desdoblan en una serie de estados electrónicos que forman las bandas de energía de los electrones. El desdoblamiento inicia con los niveles electrónicos mas externos

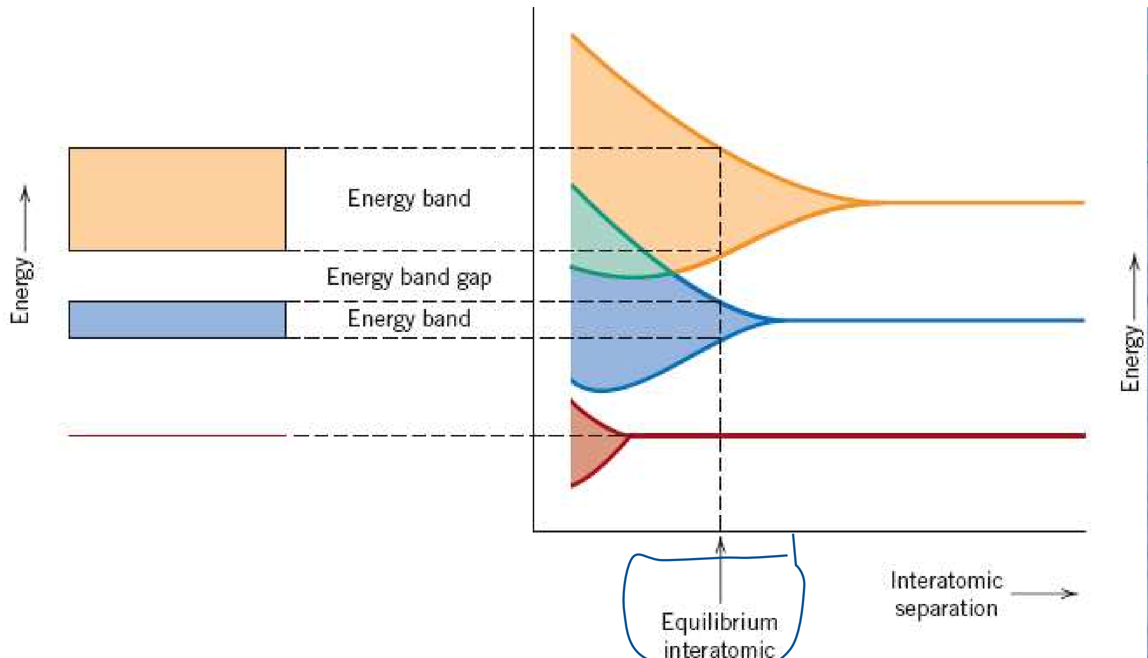
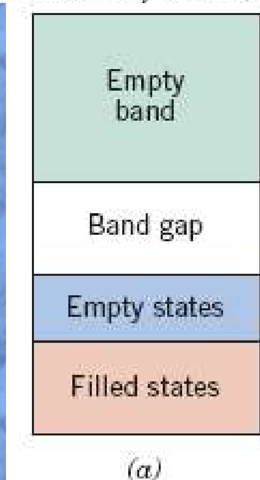
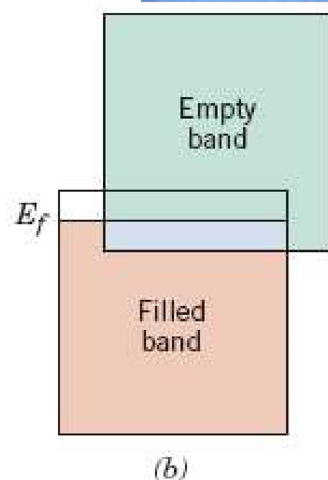


Figure 18.3 (*a*) The conventional representation of the electron energy band structure for a solid material at the equilibrium interatomic separation. (*b*) Electron energy versus interatomic separation for an aggregate of atoms, illustrating how the energy band structure at the equilibrium separation in (*a*) is generated. (From Z. D. Jastrzebski, *The Nature and Properties of Engineering Materials*, 3rd edition. Copyright © 1987 by John Wiley & Sons, Inc. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)

El número de estados dentro de cada banda será igual al número total de estados que contribuyen los N átomos.
Una banda S tiene N estados
Una banda p tiene 3N estados

Se genera una brecha de energia o brecha de banda.







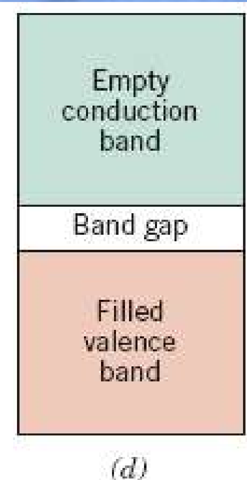


Figure 18.4 The various possible electron band structures in solids at 0 K. (*a*) The electron band structure found in metals such as copper, in which there are available electron states above and adjacent to filled states, in the same band. (*b*) The electron band structure of metals such as magnesium, wherein there is an overlap of filled and empty outer bands. (*c*) The electron band structure characteristic of insulators; the filled valence band is separated from the empty conduction band by a relatively large band gap (>2 eV). (*d*) The electron band structure found in the semiconductors, which is the same as for insulators except that the band gap is relatively narrow (<2 eV).

La energía correspondiente al estado de más alta energía a O°K se denomina **energía de Fermi, Ef.**

También es el nivel de energía en el que la mitad de los niveles de energía posibles de la banda están ocupados por electrones

METALES

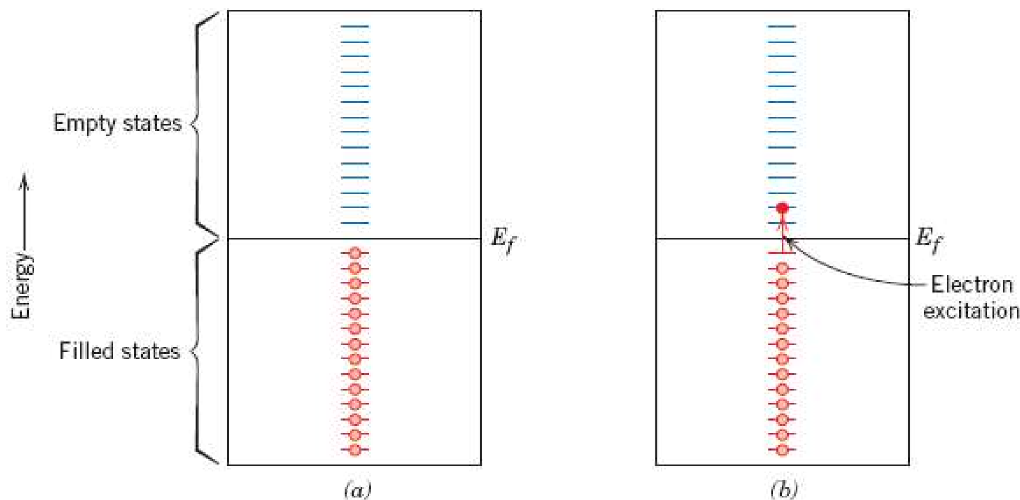


Figure 18.5 For a metal, occupancy of electron states (*a*) before and (*b*) after an electron excitation.

- Los electrones son libres cuando son excitados o promovidos hacia estados de energía vacíos y disponibles por encima de Ef
- Requieren poca energía, por ejemplo la de un campo eléctrico, para excitar electrones a la banda de conducción y generar una conducción alta.

AISLANTES

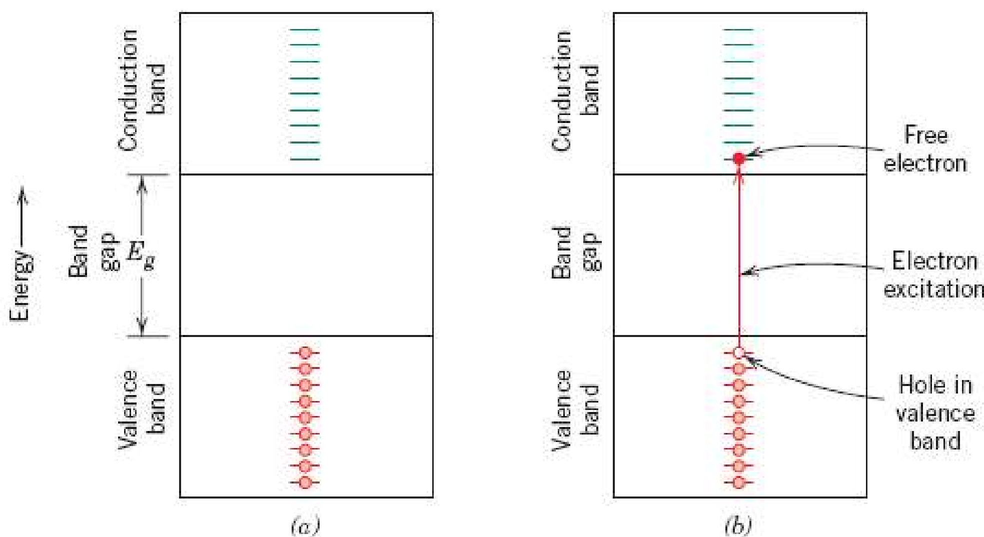
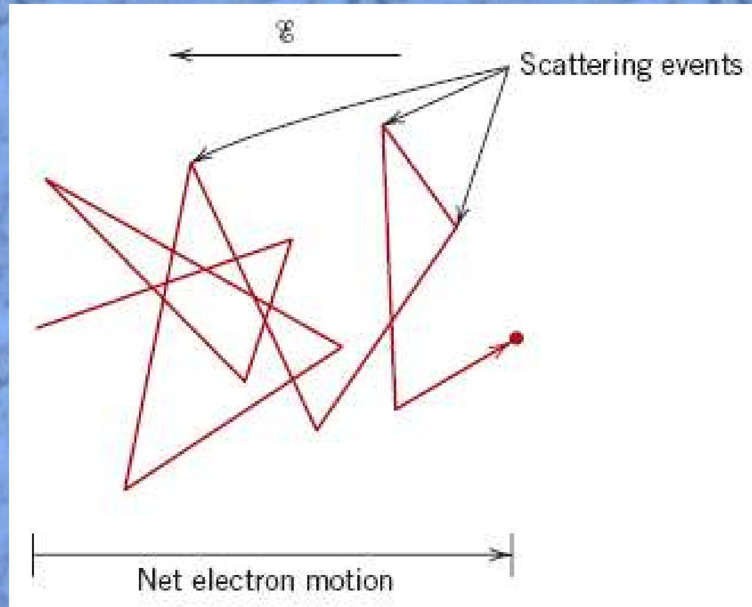


Figure 18.6 For an insulator or semiconductor, occupancy of electron states (*a*) before and (*b*) after an electron excitation from the valence band into the conduction band, in which both a free electron and a hole are generated.

- Se debe suministrar suficiente energía, que sería la energía del intervalo prohibido, esta fuente puede ser el calor o la luz.
- Cuando mayor es el gap, menor es la probabilidad de que un electrón de valencia pase a un estado energético de la banda de conducción.
- Los aislantes tienen enlaces fuertes covalentes o iónicos.. Los electrones es tan muy localizados y no son libres.

MOVILIDAD DE LOS ELECTRÓNES



Con la aplicación de un campo eléctrico los electrones se aceleran y también aparece una fuerza de fricción que contrarestra la aceleración del campo eléctrico. Esta fuerza de fricción resulta de la interacción de los electrones con los defectos de la red cristalina. Esto genera dispersión en los electrones , es decir perdida de su energía cinética y dirección.

Existe un flujo neto, que se conoce como corriente eléctrica.

Velocidad de arrastre: o movilidad de un electrón:

$$v_d = \mu_e \mathscr{E}$$

$$\sigma = n|e|\mu_e$$

Velocidad promedio del electrón en la dirección del campo eléctrico aplicado. μ_e es la constante de proporcionalidad y se conoce como la movilidad del electrón y es un indicador de la frecuencia de sucesos de dispersión. La movilidad es importante en los METALES

n es el número de electrones libres, e la carga del electrón.

$\lambda = \Gamma v_d$, λ la trayectoria medía entre colisiones depende del tiempo promedio entre colisión y la velocidad de arrastre.

RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LOS METALES

Table 18.1 Room-Temperature Electrical Conductivities for Nine Common Metals and Alloys

Metal	*Electrical Conductivity* $[(\Omega\text{-}m)^{-1}]$
Silver	6.8×10^7
Copper	6.0×10^7
Gold	4.3×10^7
Aluminum	3.8×10^7
Brass (70Cu–30Zn)	1.6×10^7
Iron	1.0×10^7
Platinum	0.94×10^7
Plain carbon steel	0.6×10^7
Stainless steel	0.2×10^7

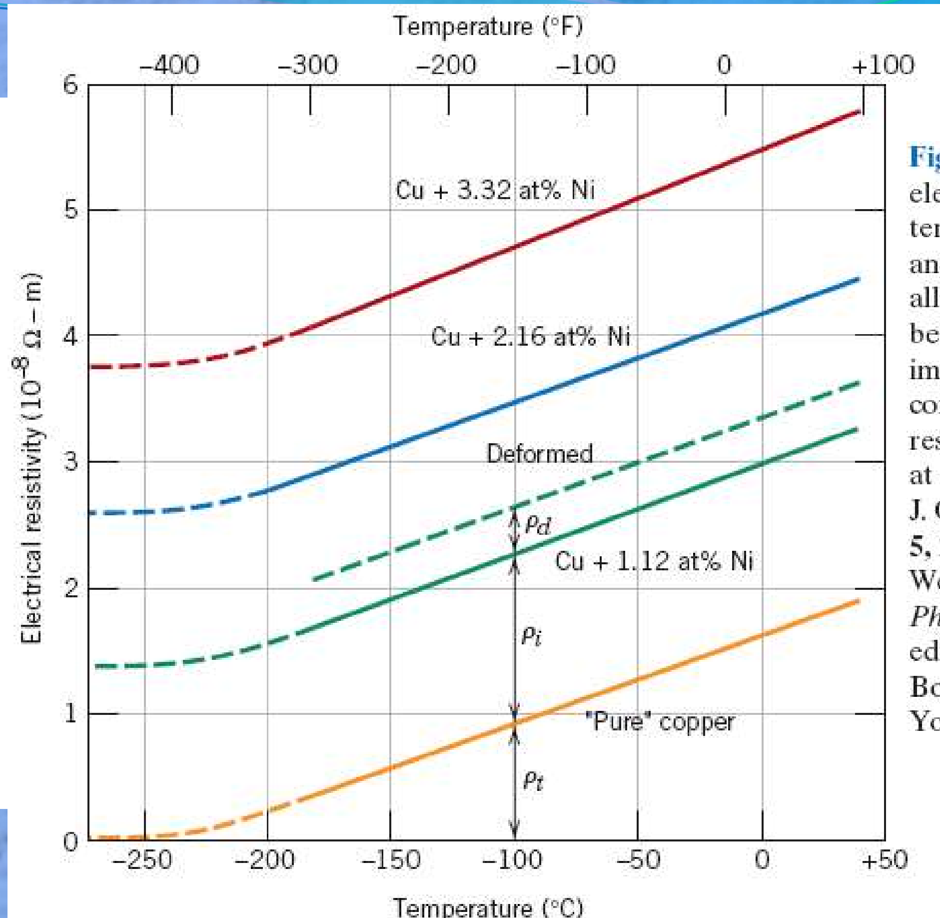


Figure 18.8 The electrical resistivity versus temperature for copper and three copper–nickel alloys, one of which has been deformed. Thermal, impurity, and deformation contributions to the resistivity are indicated at −100°C. [Adapted from J. O. Linde, *Ann. Physik*, **5**, 219 (1932); and C. A. Wert and R. M. Thomson, *Physics of Solids*, 2nd edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1970.]

La resistividad depende de la concentración de defectos, son centros de dispersión de los electrones, es decir, de la temperatura, la composición y el grado de deformación.

$$\rho_{total} = \rho_t + \rho_i + \rho_d$$

→ Contribuciones de las vibraciones térmicas, impurezas y la deformación.

$$\rho_t = \rho_0 + aT$$

→ Se aumentan las vibraciones térmicas y defectos como las vacancias.

$$\rho_i = Ac_i(1 - c_i)$$

→ Los átomos de las impurezas actúan como centro de dispersión.

Las dislocaciones actúan como centros de dispersión.

RESUMEN SEMICONDUCTORES

Semiconductores: Son materiales de conductividad intermedia entre la de los metales y la de los aislantes, que se modifica en gran medida por la temperatura, la excitación óptica y las impurezas.

Semiconductores elementales (4B): **Germanio (Ge) y Silicio (Si)**

Compuestos IV: **SiC y SiGe**

Compuestos III-V (3B-5B):

Binarios: GaAs, GaP, GaSb, AlAs, AlP, AlSb, InAs, InP y InSb

Ternarios: GaAsP, AlGaAs

Cuaternarios: InGaAsP

Compuestos II-VI (2B-6B): **ZnS, ZnSe, ZnTe, CdS, CdSe y CdTe (Telurio)**

SEMICONDUCTORES

Table 18.3 Band Gap Energies, Electron and Hole Mobilities, and Intrinsic Electrical Conductivities at Room Temperature for Semiconducting Materials

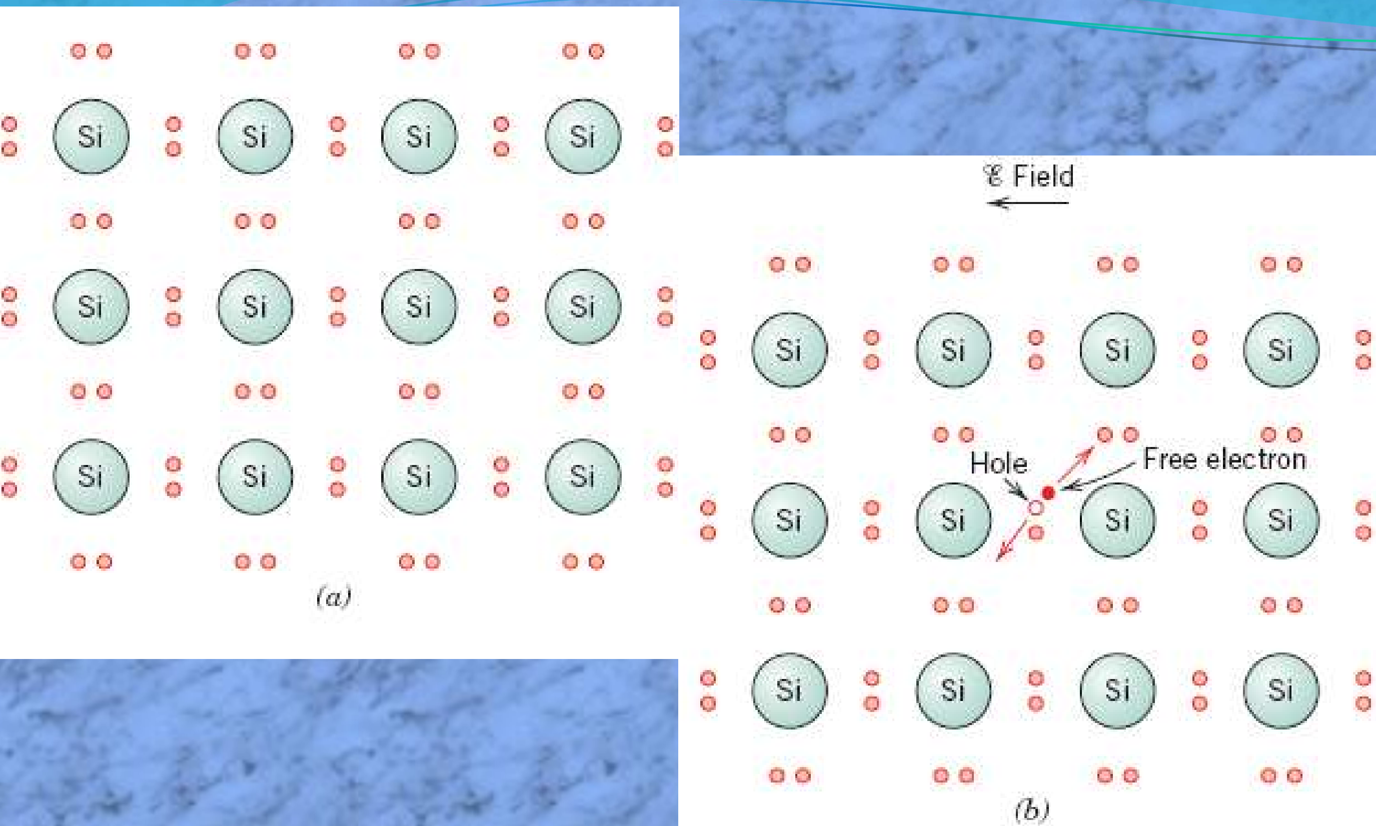
Material	*Band Gap* (eV)	*Electrical Conductivity* $[(\Omega\text{-}m)^{-1}]$	*Electron Mobility* ($m^2/V\text{-}s$)	*Hole Mobility* ($m^2/V\text{-}s$)
		Elemental		
Si	1.11	4×10^{-4}	0.14	0.05
Ge	0.67	2.2	0.38	0.18
		III–V Compounds		
GaP	2.25	—	0.03	0.015
GaAs	1.42	10^{-6}	0.85	0.04
InSb	0.17	2×10^{4}	7.7	0.07
		II–VI Compounds		
CdS	2.40	—	0.03	—
ZnTe	2.26	—	0.03	0.01

Convencionales → Si, Ge

Arseniuro de galio
Antimoniuro de indio
Sulfuro de cadmio
Telurio de zinc

SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS

CARGA POSITIVA O HUECO



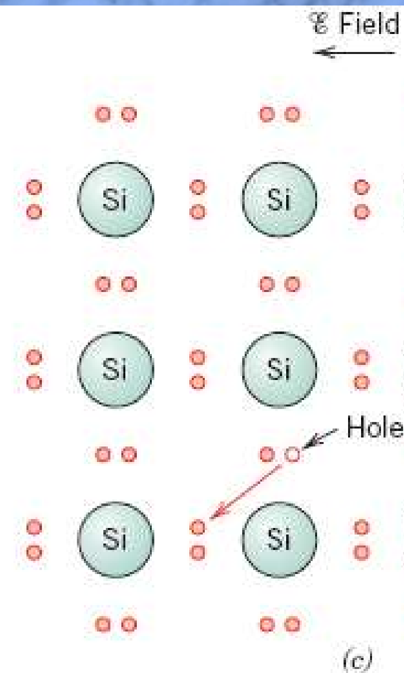


Figura 19.10 Modelo del electrón ligado para la conducción eléctrica en el silicio intrínseco: (*a*) antes de la excitación; (*b*) y (*c*) después de la excitación (los movimientos subsiguientes de los electrones libres y huecos en respuesta a un campo eléctrico aplicado).

Se deja un estado electrónico vacante en la banda de valencia, este hueco es llenado por electrón y se deja otro hueco. El electrón ausente recibe el nombre de hueco o partícula positiva, tiene la misma carga del electrón, pero con signo opuesto.

$$\sigma = n|e|\mu_e + p|e|\mu_h$$

P es un número de huecos

$$n = p = n_i$$

ni es de portadores intrínsecos

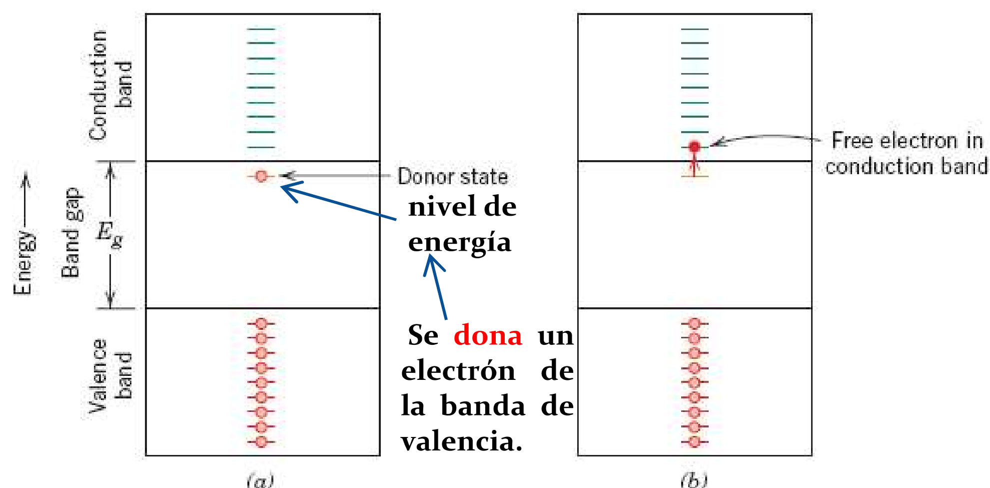
$$\sigma = n|e|(\mu_e + \mu_h) = p|e|(\mu_e + \mu_h) = n_i|e|(\mu_e + \mu_h)$$

Conductividad intrínseca

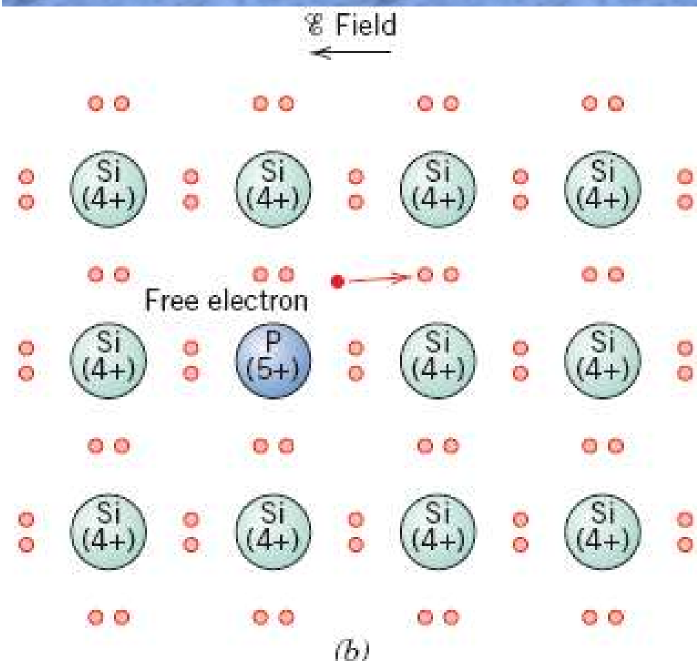
SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS

TIPO n

El comportamiento eléctrico esta determinado por las impurezas
Se conoce como Donador



El Si tiene 4 electrones para formar enlaces covalentes.
Se introduce una impureza sustitucional con valencia 5 (P, Ar, Sb)
Se forma un electrón unido débilmente por atracción electrostática, es decir, puede pasar a la banda de conducción o libre.



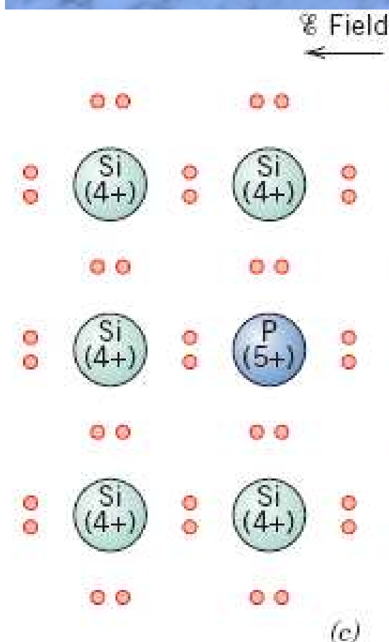
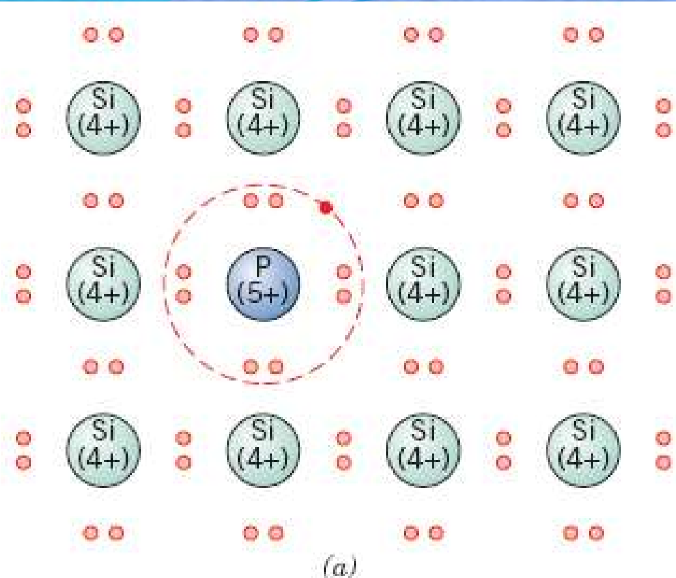


Figura 19.11 Modelo del electrón ligado de un semiconductor extrínseco de tipo *n*: (*a*) Un átomo de impureza tal como el fósforo, con cinco electrones de valencia, puede sustituir a un átomo de silicio. Esto produce un electrón de enlace extra que está ligado a la impureza y se mueve a su alrededor. (*b*) Excitación para formar un electrón libre. (*c*) Movimiento de este electrón libre en respuesta a un campo eléctrico.



nivel de energía

Se dona un electrón de la banda de valencia.

Figura 19.12 (*a*) Esquema de la estructura de bandas de energía para un nivel de la impureza donadora localizado dentro del intervalo prohibido de energía justo por debajo de la banda de conducción. (*b*) Excitación desde el estado donador para crear un electrón libre en la banda de conducción.

$$n \gg p$$

$$\sigma \cong n|e|\mu_e$$

SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS TIPO p

Impurezas con valencia 3, como Br, Al o Ga. No se forma un enlace covalente. Se ilustra como un hueco cerca a la impureza sustituciónal. Este hueco es liberado por la transferencia de un electrón desde un enlace adyacente. Se conoce como Aceptor.

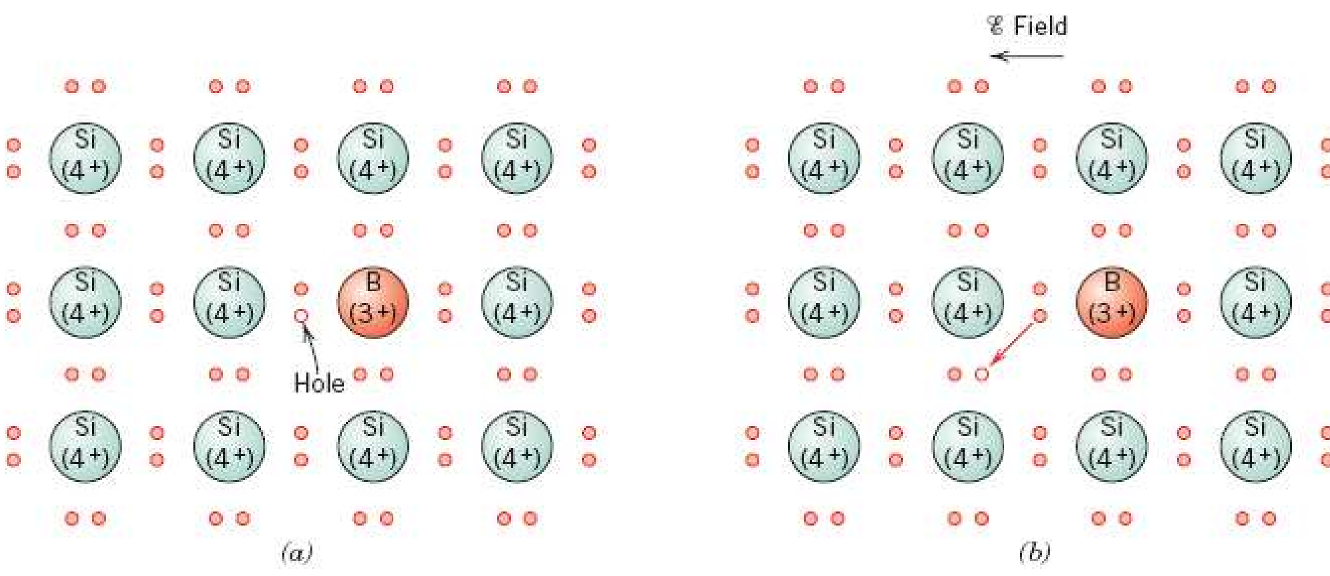


Figura 19.13 Modelo del electrón ligado de un semiconductor extrínseco de tipo *p*. (*a*) Un átomo de impureza, tal como el boro, que tiene tres electrones de valencia, puede sustituir a un átomo de silicio. Esto produce una deficiencia de un electrón de valencia, o sea, un hueco asociado con el átomo de impureza. (*b*) Movimiento de este hueco en respuesta a un campo eléctrico.

El hueco y el electrón intercambian sus posiciones. El hueco es un estado excitado y se genera la conducción.

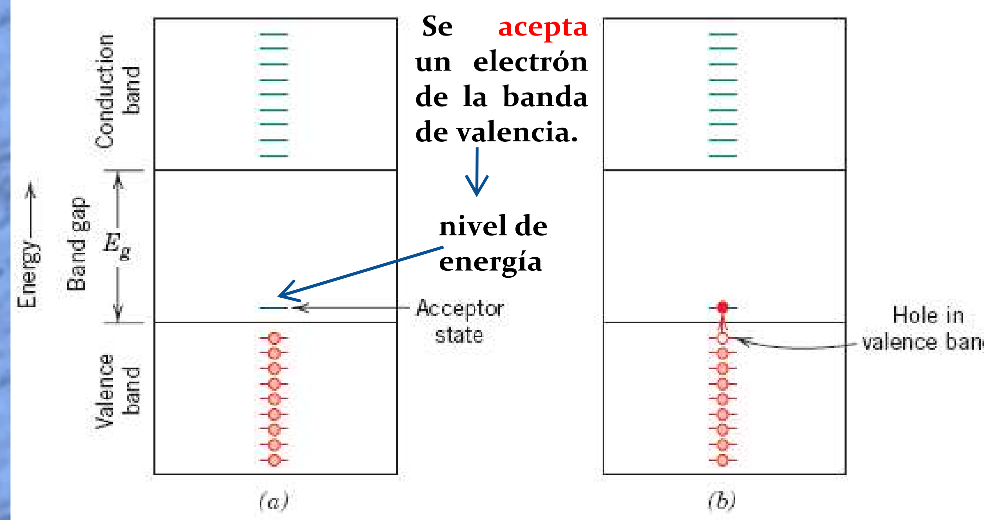


Figura 19.14 (*a*) Esquema de las bandas de energía para una impureza aceptora localizada en el intervalo prohibido de energía y justo por encima de la banda de valencia. (*b*) Excitación de un electrón a los niveles aceptores dejando detrás un hueco en la banda de valencia.

$$p \gg n$$

$$\sigma \cong p|e|\mu_h$$

EFECTO DE LA TEMPERATURA

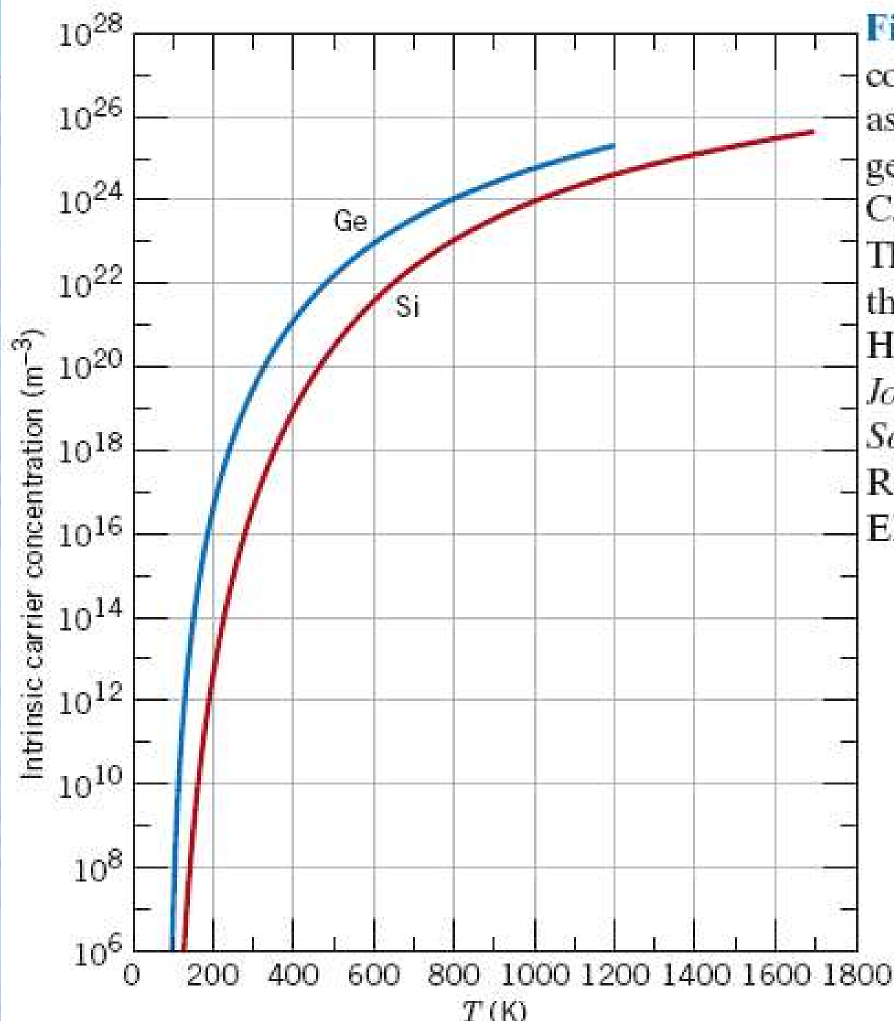


Figure 18.16 Intrinsic carrier concentration (logarithmic scale) as a function of temperature for germanium and silicon. (From C. D. Thurmond, "The Standard Thermodynamic Functions for the Formation of Electrons and Holes in Ge, Si, GaAs, and GaP," *Journal of The Electrochemical Society*, **122,** [8], 1139 (1975). Reprinted by permission of The Electrochemical Society, Inc.)

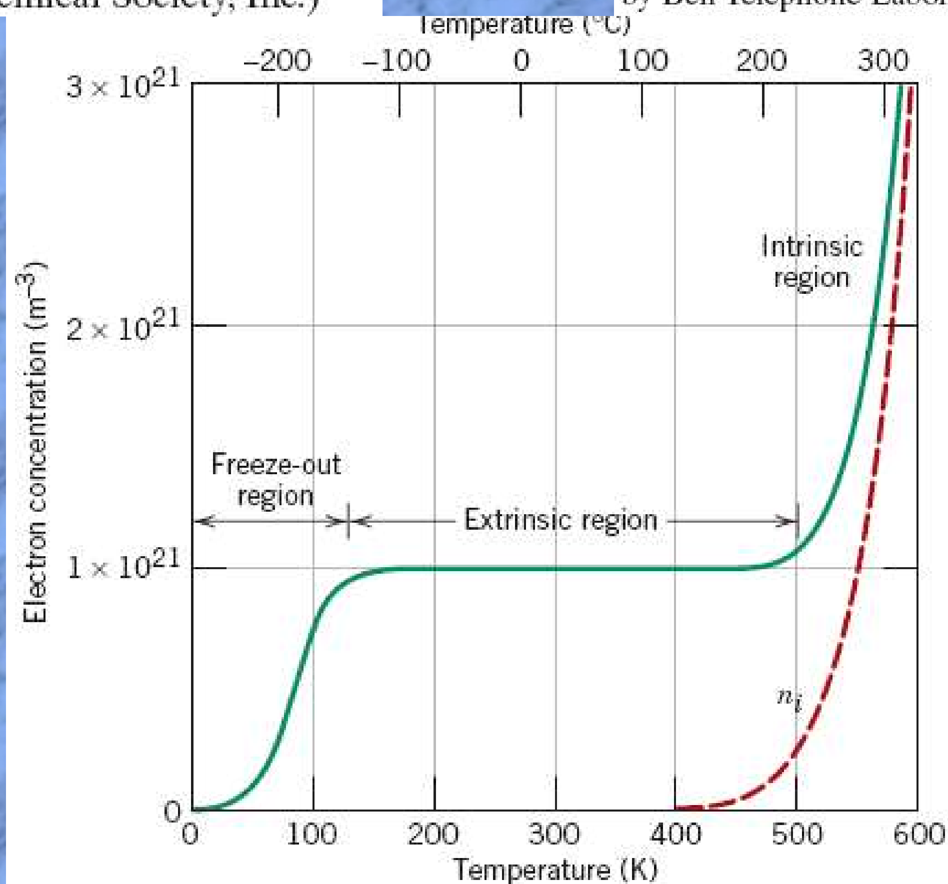
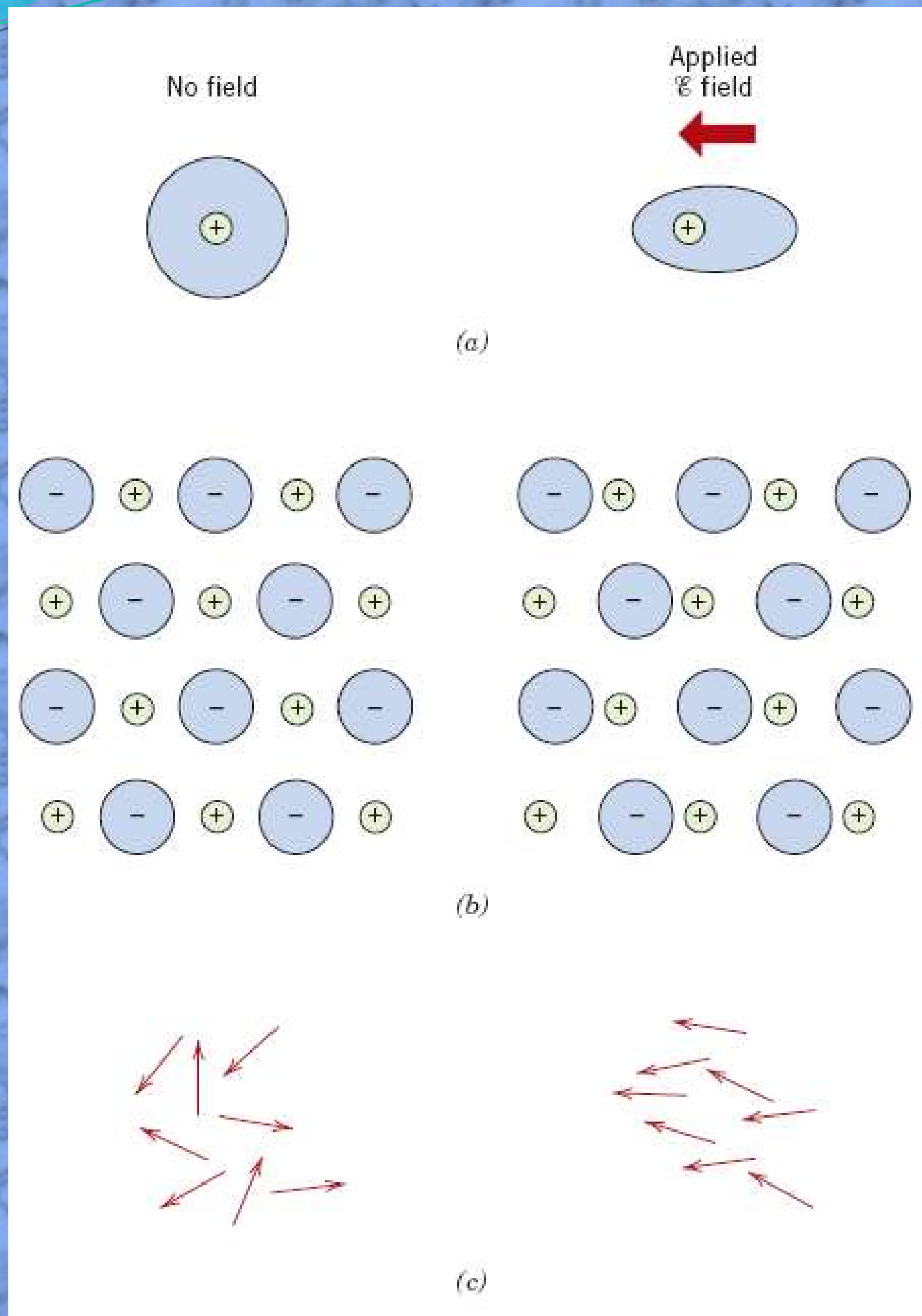


Figure 18.17 Electron concentration versus temperature for silicon (n-type) that has been doped with 10^{21} m^{-3} of a donor impurity, and for intrinsic silicon (dashed line). Freeze-out, extrinsic, and intrinsic temperature regimes are noted on this plot. (From S. M. Sze, *Semiconductor Devices, Physics and Technology*. Copyright © 1985 by Bell Telephone Laboratories, ... sion of

POLARIZACIÓN



La **polarización electrónica** se produce del desplazamiento del centro de la nube electrónica cargada negativamente con respecto al núcleo positivo de un átomo.

La **polarización iónica** se produce por el desplazamiento de los cationes y aniones en diferentes direcciones.

La **polarización por orientación** se produce solamente en las sustancias cuyas moléculas son polares, es decir que contienen dipolos aún sin la presencia de campo eléctrico exterior. Estos dipolos normalmente distribuidos al azar se orientan en presencia de un campo exterior, con la consiguiente polarización de la sustancia.

PIEZOELECTRICIDAD

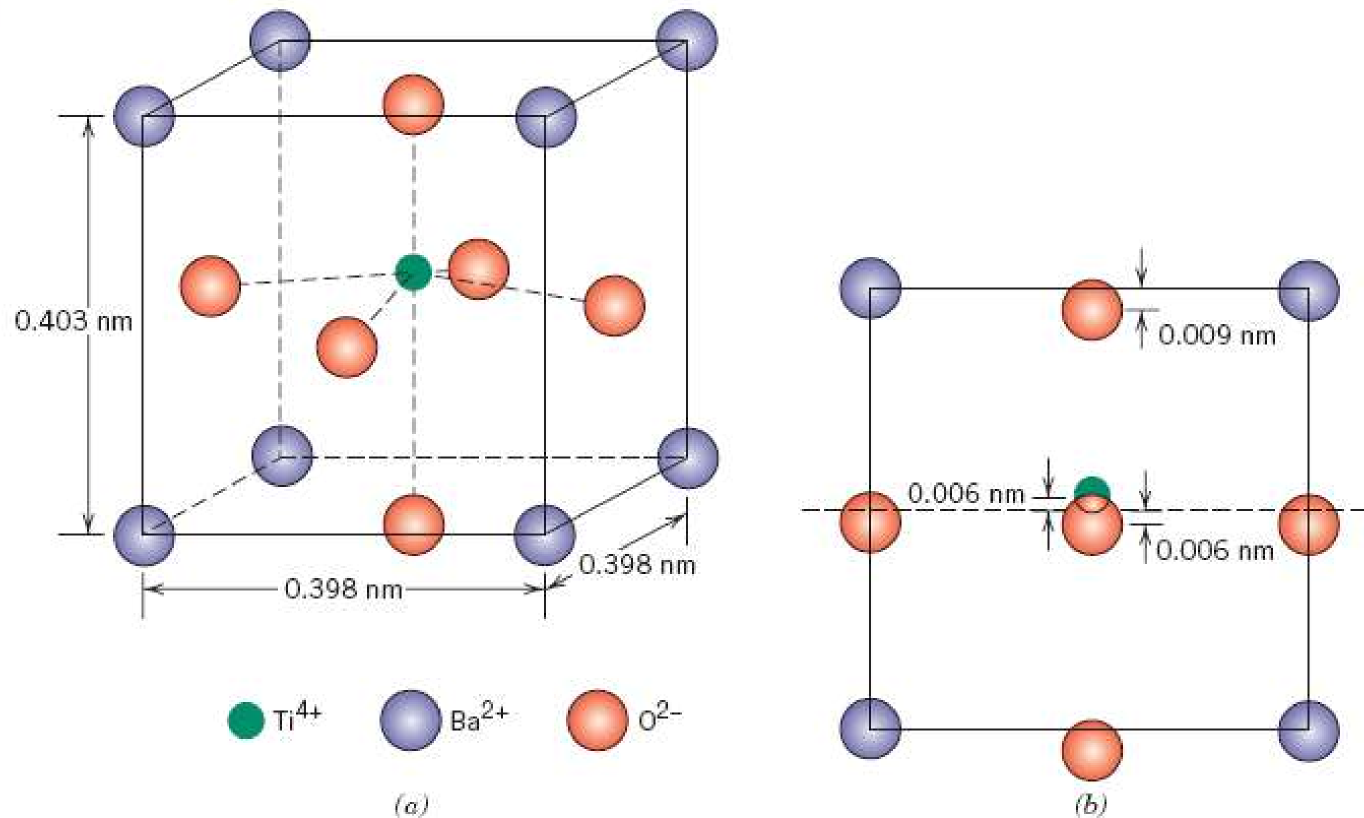
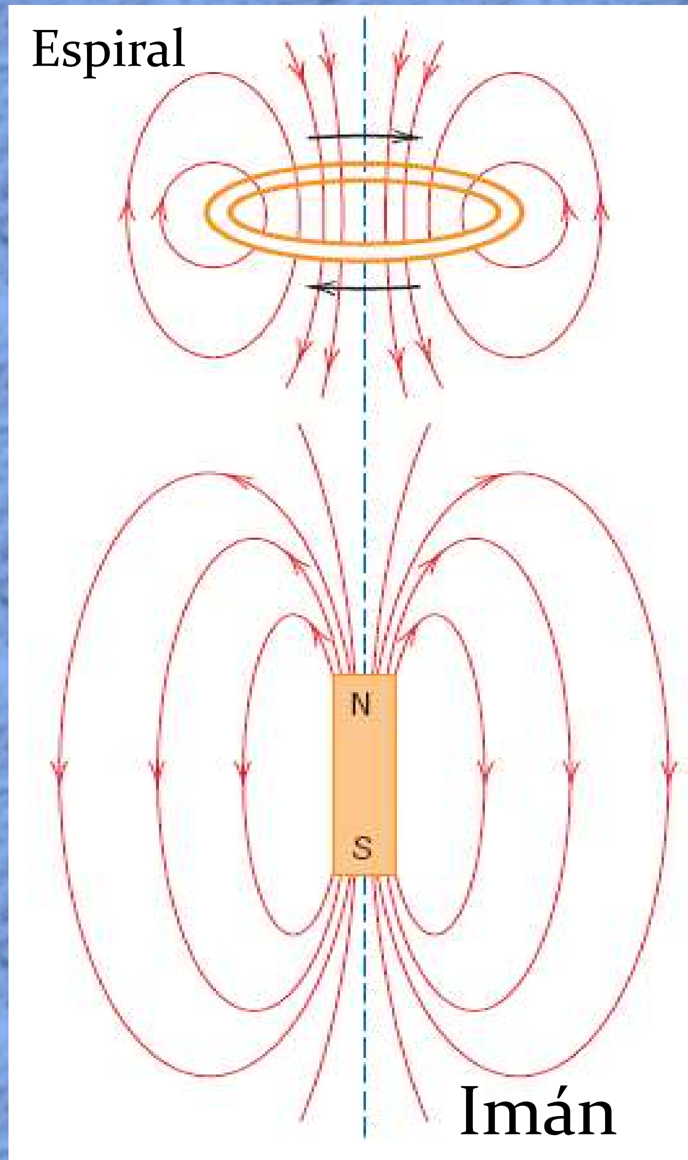


Figure 18.35 A barium titanate ($BaTiO_3$) unit cell (*a*) in an isometric projection, and (*b*) looking at one face, which shows the displacements of Ti^{4+} and O^{2-} ions from the center of the face.

No hay un centro de simetría : se generan dipolos: Ferroelectricidad.
Los atamos de oxigeno y titanio se desplazan en direcciones opuestas.
Se producen momentos dipolares eléctricos y se alinean en una sola dirección

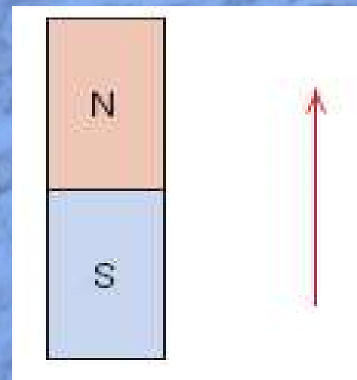
PROPIEDADES MAGNETÍCAS

Las fuerzas magnéticas son generadas por partículas con carga eléctrica en movimiento.



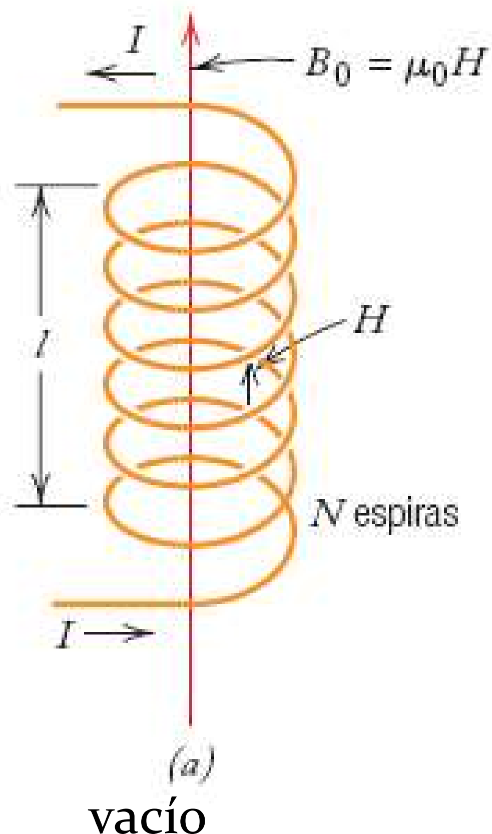
$$H = \frac{NI}{l}$$

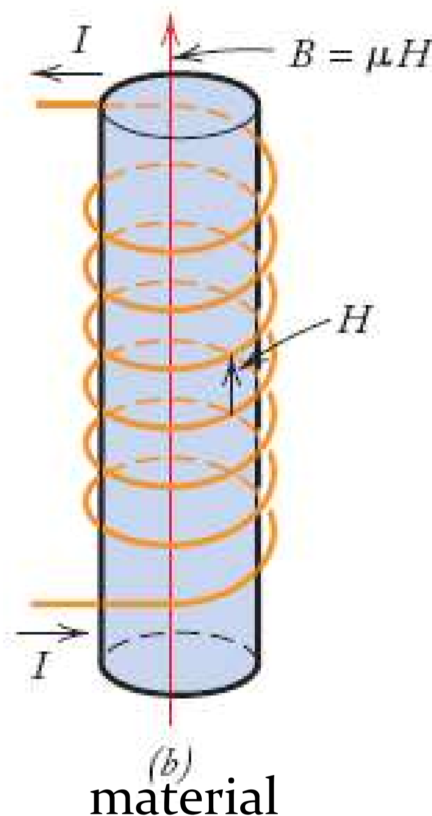
H es la intensidad del campo magnético
N número de espiras
l longitud
I Corriente



Se generan dipolos magnéticos

Se representan como imanes formando un polos norte y sur. También se representan con flechas.





$$B_0 = \mu_0 H$$

La permeabilidad es la capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través de si los campos magnéticos.

Es una medida del grado en que puede ser magnetizado un material.

La facilidad con que se puede inducir un campo B en presencia de un campo H.

$$B = \mu H$$

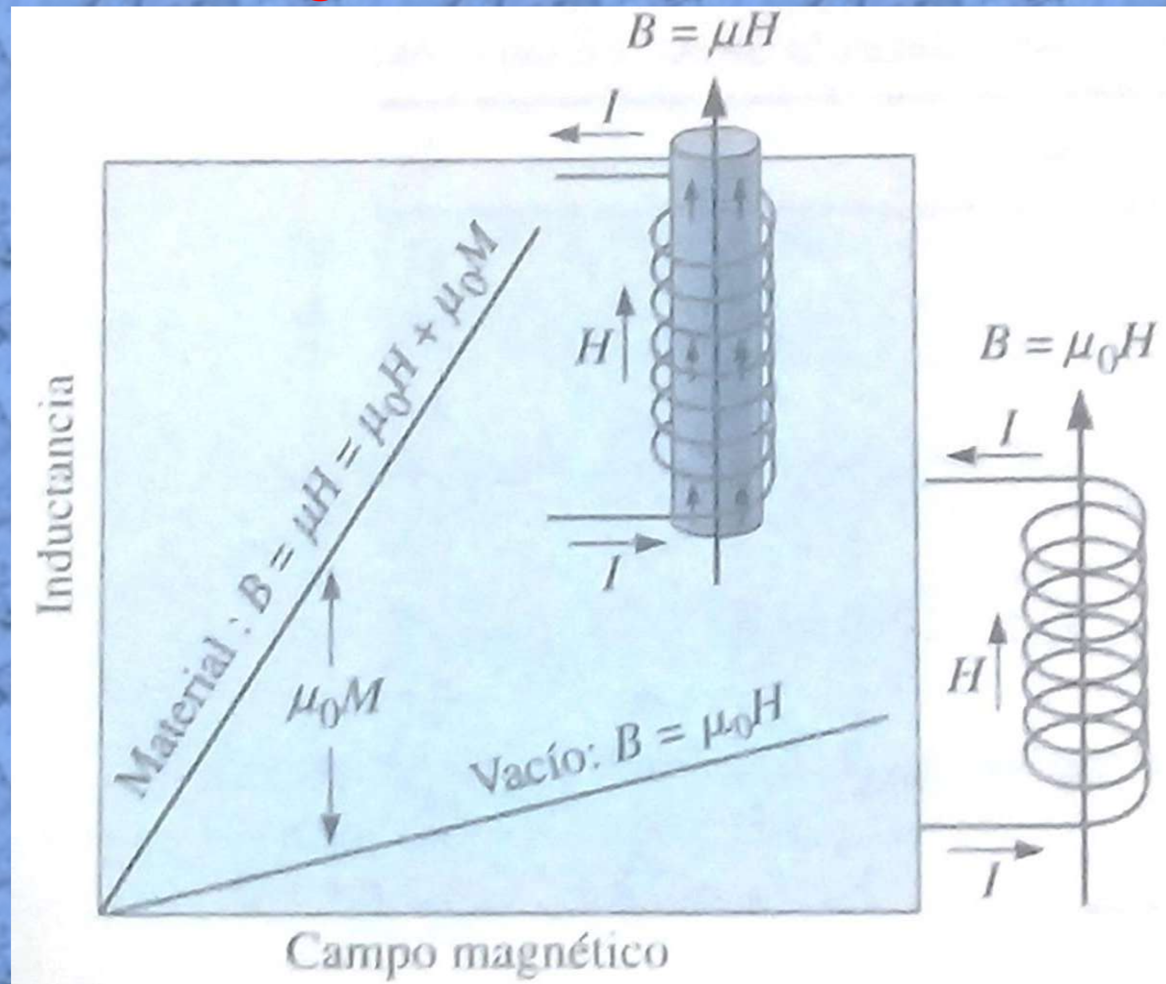
Inducción magnética o densidad de flujo o inductancia: Representa el número de líneas de flujo.

μ es la permeabilidad del material

Altos valores de permeabilidad significa que el material amplifica el campo magnético.

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M$$

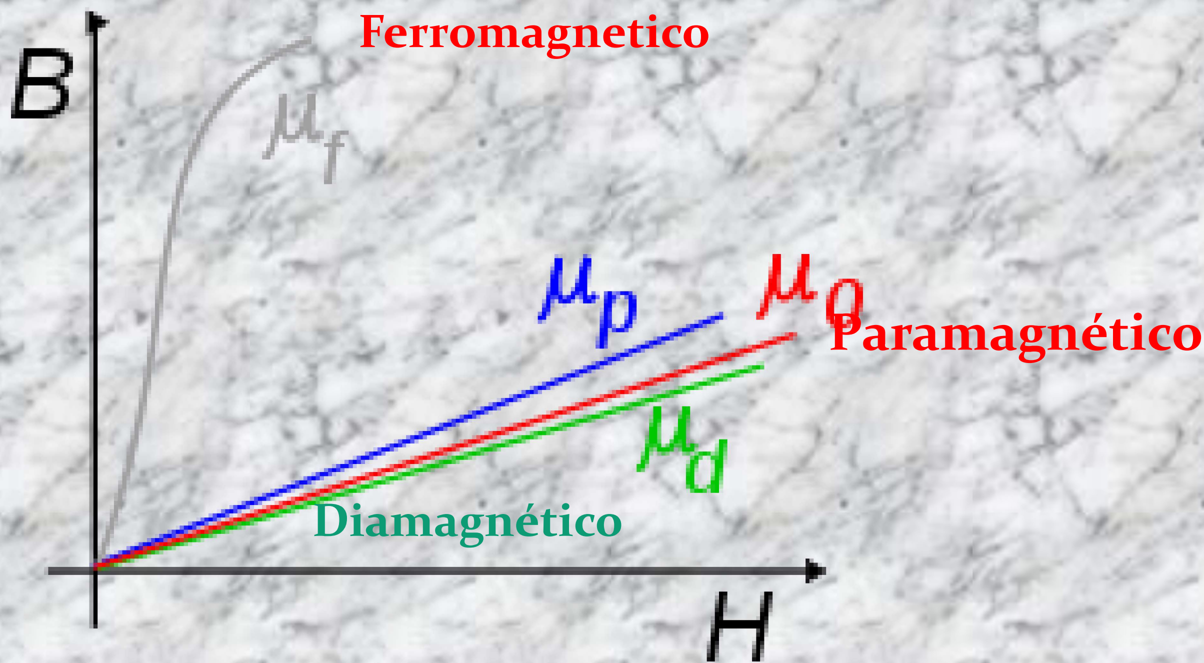
M: Magnetización del sólido



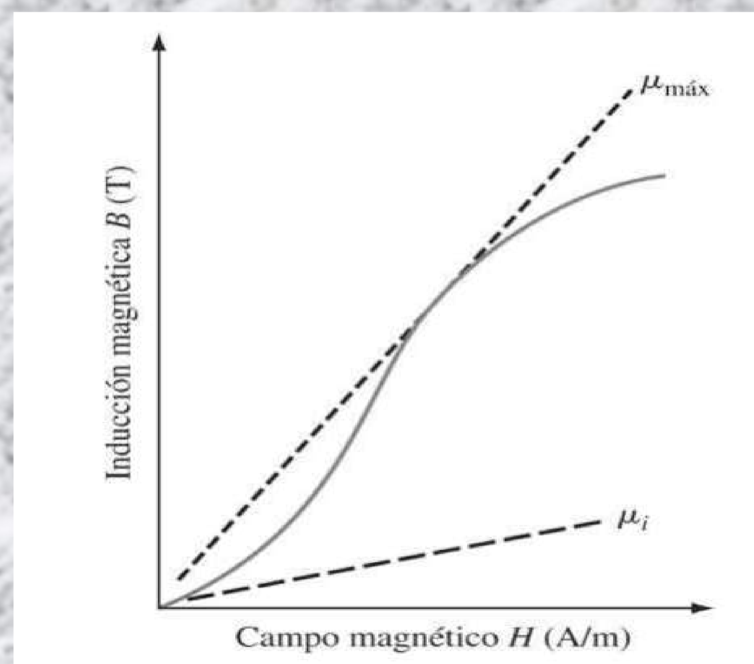
En presencia de H, los momentos magnéticos se alinean con el campo magnético.
Representa el incremento de la inductancia debido al material del núcleo o material magnético.
Tiene la misma función de la polarización o esfuerzo.
Ej: El esfuerzo genera deformaciones.
El campo magnético (H) genera magnetización (M) que contribuye a la densidad de flujo (B)

Permeabilidad relativa

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$



Una mayor permeabilidad significa que el material amplifica el campo magnético.



La permeabilidad No es una constante , cambia cuando se magnetiza el material.

$$M = \chi_m H$$

Materiales diamagnéticos : < o
Materiales paramagnéticos : > o
Materiales ferromagnéticos α

$$\chi_m = \mu_r - 1$$

Ambos están relacionados con la incremento del campo magnético por le material →

X_m es la susceptibilidad magnética. Se relaciona con la facilidad que un material presenta para ser magnetizado por un campo magnético H. Es la amplificación producida por el material.

Tabla 20.1 Unidades magnéticas y factores de conversión para los sistemas SI y cgs-uem

		Unidades SI			
Magnitud	*Símbolo*	*Derivada*	*Fundamental*	*Unidades cgs-uem*	*Conversión*
Inducción magnética (densidad de flujo)	B	tesla $(Wb/m^2)^a$	kg/s-C	gauss	$1\ Wb/m^2 = 10^4$ gauss
Intensidad del campo magnético	H	amp-vuelta/m	C/m-s	oersted	1 amp-vuelta/m = $4\pi \times 10^{-3}$ oersted
Magnetización	M (SI) I(cgs-uem)	amp-vuelta/m	C/m-s	maxwell/cm^2	1 amp-vuelta/m = 10^{-3} maxwell/cm^2
Permeabilidad del vacío	μ_0	henrios/m^b	kg-m/C^2	adimensional (uem)	$4\pi \times 10^{-7}$ henrios/m = 1 uem
Permeabilidad relativa	μ_r (SI) μ' (cgs-uem)	adimensional	adimensional	adimensional	$\mu_r = \mu'$
Susceptibilidad	χ_m (SI) χ'_m (cgs-uem)	adimensional	adimensional	adimensional	$\chi_m = 4\pi\chi'_m$

a Las unidades del weber (Wb) son voltios-segundo.
b Las unidades del henrio son weber por amperio.

PROPIEDADES MAGNETICAS

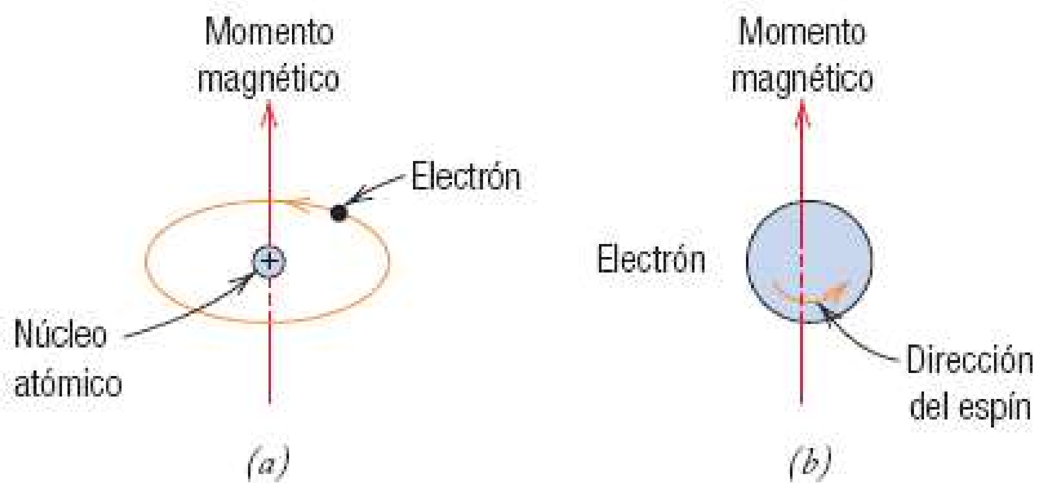


Figura 20.4 Demostración del momento magnético asociado con (*a*) un electrón describiendo una órbita alrededor del núcleo y (*b*) el movimiento de espín del electrón.

Se consideran los electrones como pequeños imanes elementales.

Momento magnético fundamental de un electrón debido al giro se conoce como Magnetón de Bohr. Es una constantes fundamental:

$$\mu_B = \frac{eh}{4\pi \rho m}$$

$$9.27 \times 10^{-24}\ \text{A-m}^2$$

Se considera los electrones como pequeños imanes

En los átomos, los momentos orbitales de algunos pares de electrones se cancelan entre si, también pasa con los momentos de spín.

Electrones desapareados 3d	Átomo	Número de electrones	Configuración electrónica orbitales 3d					Electrones 4s
3	V	23	↑	↑	↑			2
5	Cr	24	↑	↑	↑	↑	↑	1
5	Mn	25	↑	↑	↑	↑	↑	2
4	Fe	26	↑↓	↑	↑	↑	↑	2
3	Co	27	↑↓	↑↓	↑	↑	↑	2
2	Ni	28	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑	2
0	Cu	29	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	1

Figura 12.6. Momentos magnéticos de átomos neutros con elementos de transición 3d.

Cada átomo se puede comportar como un dipolo magnético, pero cuando los atamos forman materiales cristalinos estos momentos magnéticos se cancelan.

El Cromo: Los momentos magnéticos de los átomos del centro de la celda unitaria están en oposición a los momentos magnéticos de los átomos de las esquinas.

Los electrones impares en el cobre y se cancelan por interacciones con otros átomos. El cobre tiene una capa 3d llena por completo, es decir no presenta momento magnético neto.

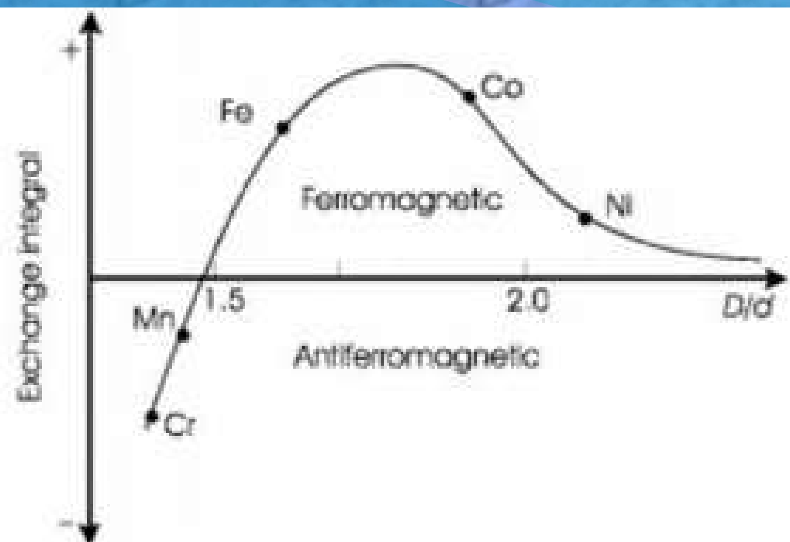


Figure 12.8 The Bethe–Slater curve for the magnitude of the exchange integral as a function of D/d, where D is the separation of the atoms in a crystal, and d is the diameter of the 3d orbital

Las fuerzas de intercambio son despreciables cuando los átomos están separados varias veces, como pasa en los cristales. Cuando los átomos se colocan cerca, las fuerzas aumentan hasta un pico cuando los momentos de los spines se mantienen paralelos.

Con separaciones muy pequeñas, los espines se colocan anti paralelos.

Cuando se alea el Mn, aumenta la separación interatómica y se convierte en ferromagnético.

El alineamiento de los polos tiene una energía de intercambio positiva.

Relación entre el espaciado atómico y el diámetro del orbital 3d.: 1.4 a 2.7.

Depende de la distancia de los átomos

Los electrones no apareados no están en la última capa

DIAMAGNETISMO Y PARAMAGNETISMO

Es inducido por un cambio en el movimiento orbital de los electrones . La magnitud del momento inducido es pequeño con signo opuesto. La permeabilidad es menor a la unidad y la susceptibilidad es negativa, es decir, el valor de B es menor que en el vacío.

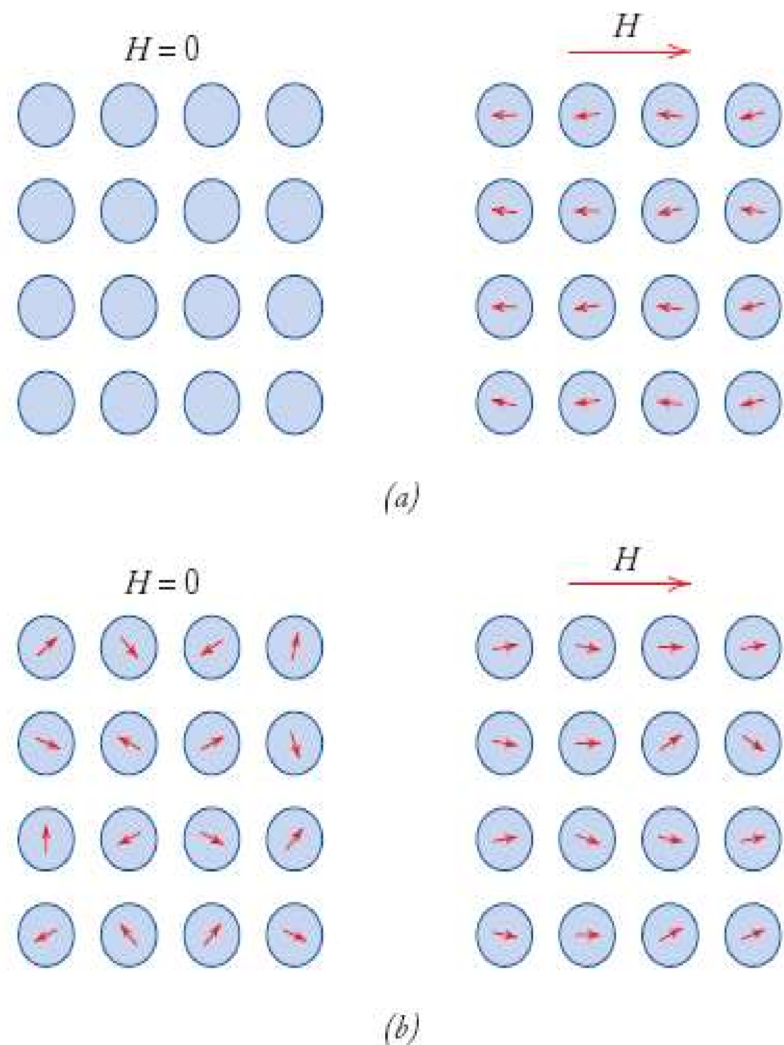


Figura 20.5 (*a*) Configuración dipolar atómica de un material diamagnético con y sin campo magnético. En ausencia de un campo externo, no existen dipolos; en presencia de un campo, se inducen dipolos que se alinean en dirección opuesta a la dirección del campo. (*b*) Configuración dipolar atómica con y sin un campo magnético aplicado para un material paramagnético.

Existe un momento dipolar permanente que se debe a la cancelación incompleta de los momentos magnéticos del espín de los electrones y o de los momentos orbitales. Sin campo magnético estos momentos son aleatorios. Con un campo magnético, por rotación hay una alineación.

La permeabilidad es mayor que la unidad y la susceptibilidad es pequeña y positiva.

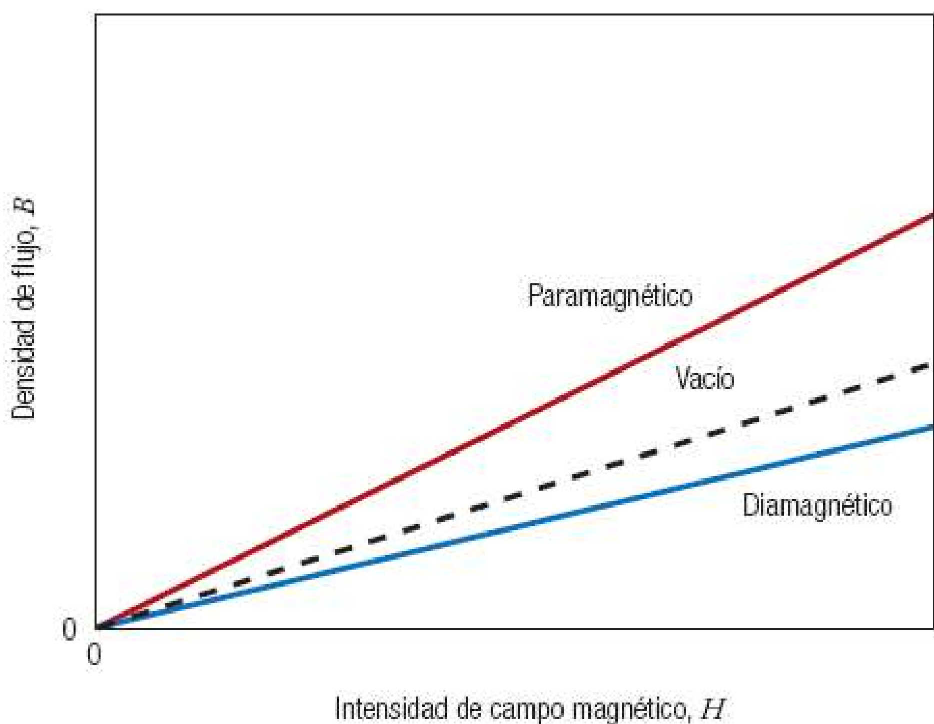


Figura 20.6 Representación esquemática de la densidad de flujo B *versus* la intensidad de campo magnético H en materiales diamagnéticos y paramagnéticos.

En los materiales paramagnéticos dan origen a una permeabilidad relativa mayor de la unidad y una pequeña susceptibilidad magnética.

Tabla 20.2 Susceptibilidades magnéticas a temperatura ambiente de los materiales diamagnéticos y paramagnéticos

Diamagnéticos		*Paramagnéticos*	
Material	*Susceptibilidad* χ_m *(volumen) (unidades SI)*	*Material*	*Susceptibilidad* χ_m *(volumen) (unidades SI)*
Cinc	-1.56×10^{-5}	Aluminio	2.07×10^{-5}
Cloruro de sodio	-1.41×10^{-5}	Circonio	1.09×10^{-4}
Cobre	-0.96×10^{-5}	Cloruro de cromo	1.51×10^{-3}
Mercurio	-2.85×10^{-5}	Cromo	3.13×10^{-4}
Oro	-3.44×10^{-5}	Molibdeno	1.19×10^{-4}
Óxido de aluminio	-1.81×10^{-5}	Sodio	8.48×10^{-6}
Plata	-2.38×10^{-5}	Sulfato de manganeso	3.70×10^{-3}
Silicio	-0.41×10^{-5}	Titanio	1.81×10^{-4}

FERROMAGNETISMO

Momento magnético permanente en ausencia de un campo externo y magnetizaciones permanentes muy grandes.
Altos valores de susceptibilidad (como 10^6)

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \qquad H \ll M \qquad B \cong \mu_0 M$$

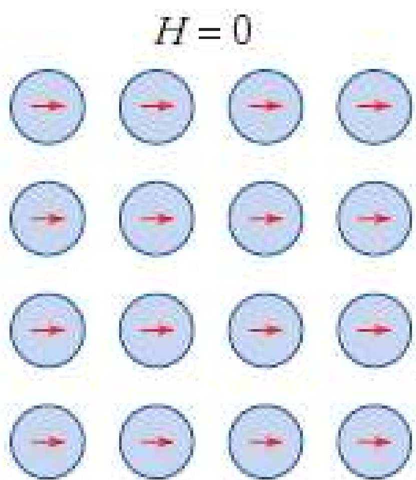


Figura 20.7 Ilustración esquemática de la alineación mutua de los dipolos atómicos en un material ferromagnético, la cual existe aun en ausencia de un campo magnético externo.

El momento magnético permanente es el resultado de los momentos magnéticos debido a los espines de los electrones (la contribución orbital es pequeña)

Ni, Fe, Co, y algunas tierras raras ***como el gadolinio Gd. Se alinean los espines de los electrones internos no apareados en sus redes cristalinas.***
La magnetización de saturación es igual al producto del momento magnético neto de cada átomo y el número de átomos presentes. Los momentos magnéticos netos del Fe, Co y Ni por átomo son 2.22, 1.72 y 0.60 magnetrones de Bohr, respectivamente.

ANTIFERROMAGNETISMO Y FERRIMAGNETISMO

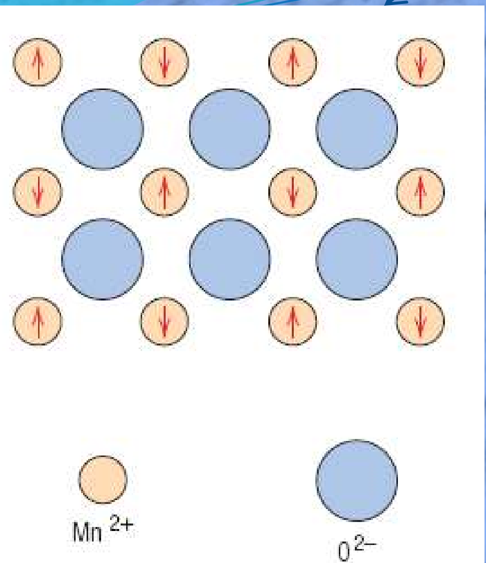


Figura 20.8 Representación esquemática del alineamiento antiparalelo de los momentos magnéticos de espín en el óxido de manganeso antiferromagnético.

En presencia de un campo magnético los dipolos magnéticos de los átomos se alinean en direcciones opuestas.

Los planos(111) tiene un momentos magnético opuesto

$Fe_3O_4 \rightarrow Fe^{2+}O^{2-}—(Fe^{3+})_2(O^{2-})_3$

Hay cancelación incompleta de los momentos de espín.

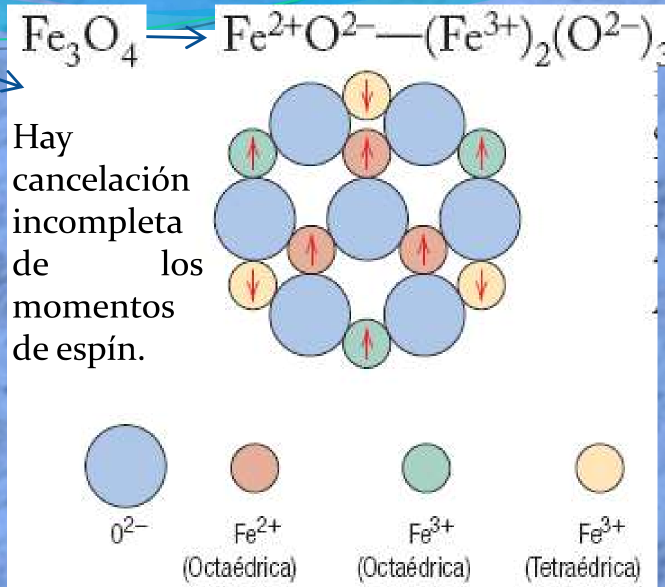


Figura 20.9 Diagrama esquemático que muestra la configuración del momento magnético de espín de los iones Fe^{2+} y Fe^{3+} en el Fe_3O_4. (Adaptado de Richard A. Flinn y

Tabla 20.3 Distribución de los momentos magnéticos de espín para los iones Fe^{2+} y Fe^{3+} en una celdilla unidad de Fe_3O_4[a]

Catión	Posición octaédrica de la red	Posición tetraédrica de la red	Momento magnético neto
Fe^{3+}	↑↑↑↑	↓↓↓↓	
	↑↑↑↑	↓↓↓↓	Cancelación completa
Fe^{2+}	↑↑↑↑	—	↑↑↑↑
	↑↑↑↑		↑↑↑↑

[a] Cada flecha representa la orientación del momento magnético de uno de los cationes.

Tabla 20.4 Momentos magnéticos netos para seis cationes

Catión	Momento magnético neto de espín (magnetones de Bohr)
Fe^{3+}	5
Fe^{2+}	4
Mn^{2+}	5
Co^{2+}	3
Ni^{2+}	2
Cu^{2+}	1

INFLUENCIA DE LATEMPERATURA

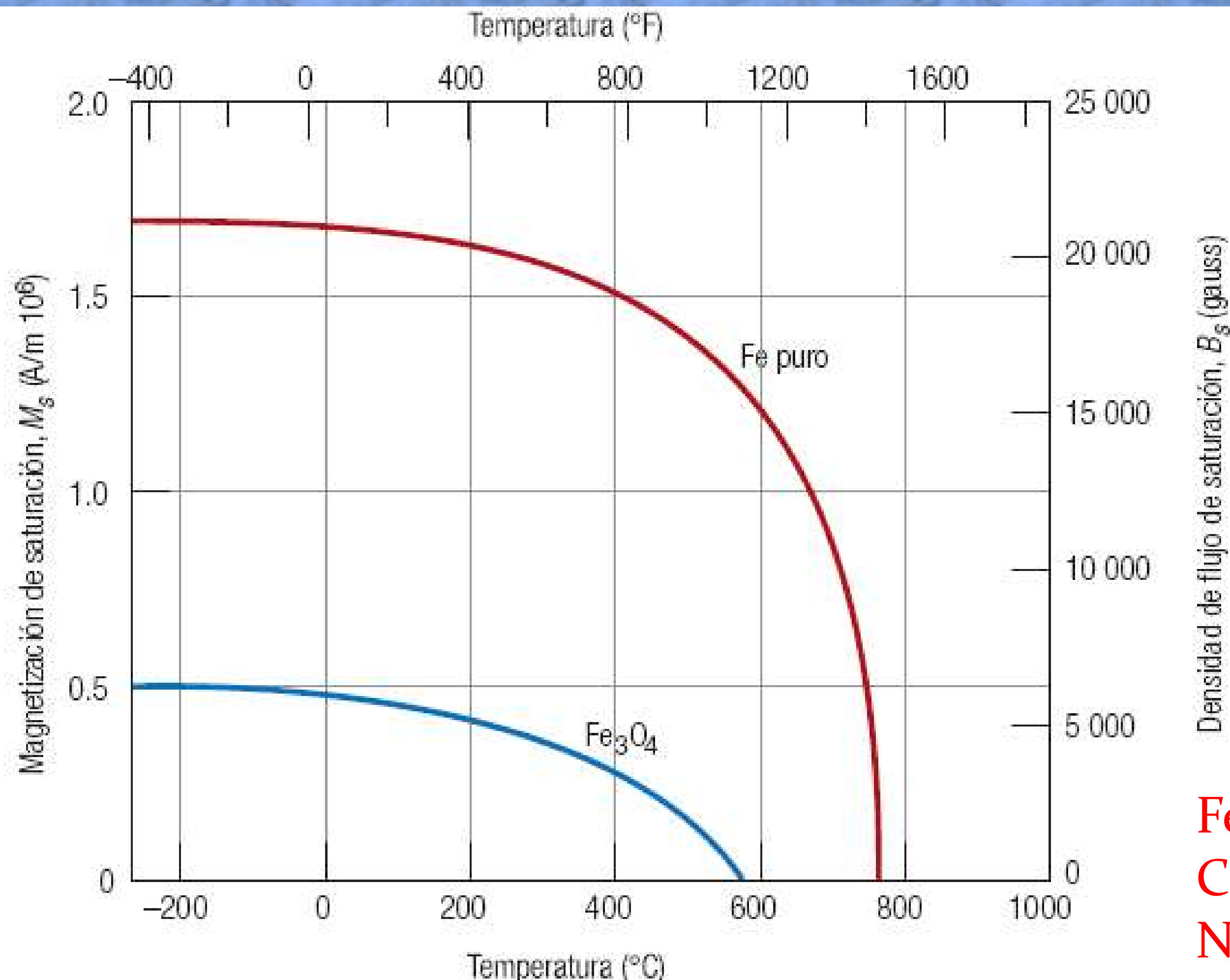


Figura 20.10 Gráfica de la magnetización de saturación como una función de la temperatura en el hierro y el Fe_3O_4. [Adaptado de J. Smit y H. P. J. Wijn, *Ferrites*. Copyright © N. V. Philips Gloeilampenfabrieken, Eindhoven (Holanda). Reproducida con permiso.]

Fe	768 C
Co	1120 C
Ni	335 C

Con el aumento de la temperatura se vuelven aleatorias o pueden girara los momentos que estaban alineados. Se contrarrestan las fuerzas de acoplamiento entre los momentos de los dipolos atómicos adyacentes, desalineando los dipolos, con esto se disminuye la magnetización de saturación de los materiales. Cuando la magnetización de saturación logra un valor de cero, se llega a la **TEMPERATURA DE CURIE. Sobre la Tc los materiales son paramagnéticos**

DOMINIO Y HISTERESIS

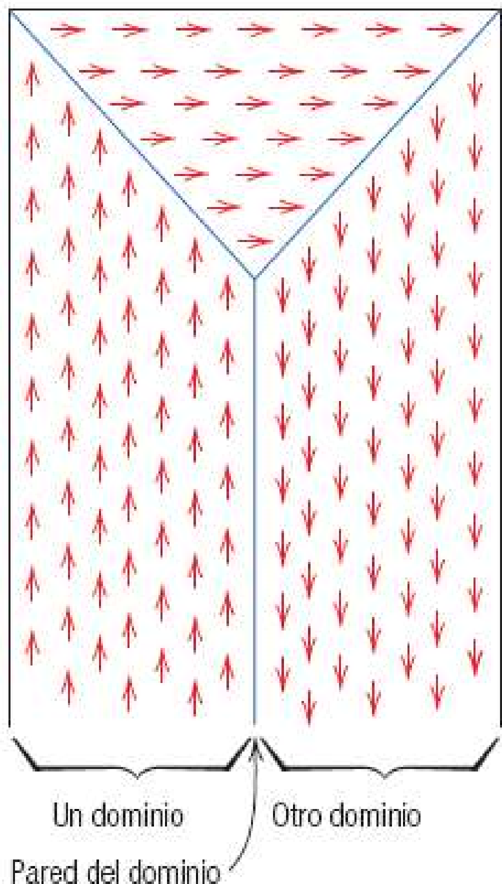


Figura 20.11 Ilustración esquemática de los dominios en un material ferromagnético o ferrimagnético; las flechas representan los dipolos magnéticos atómicos. Dentro de cada dominio, todos los dipolos están alineados, mientras que la dirección de la alineación varía de un dominio a otro.

Los materiales ferro-ferri magnéticos están compuestos por regiones de pequeño volumen en las cuales existe un alineamiento en la misma dirección de todos los momentos dipolares magnéticos. Estas regiones se llaman **dominios . Cada dominio esta saturado hasta su saturación**

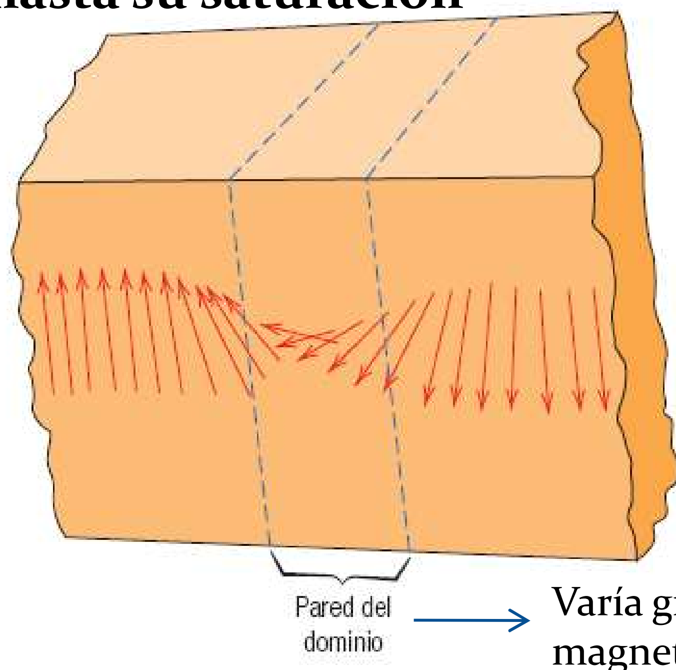


Figura 20.12 El cambio gradual en la orientación de un dipolo magnético a través de la pared de un dominio. (Tomado de W. D. Kingery, H. K. Bowen y D. R. Uhlmann, *Introduction to Ceramics*, 2a. edición. Copyright © John Wiley & Sons, Nueva York. Reproducido con permiso de John Wiley & Sons, Inc.)

Conocidos como pared de Bloch (aprox. 100 nm)

→ Varía gradualmente la dirección de magnetización

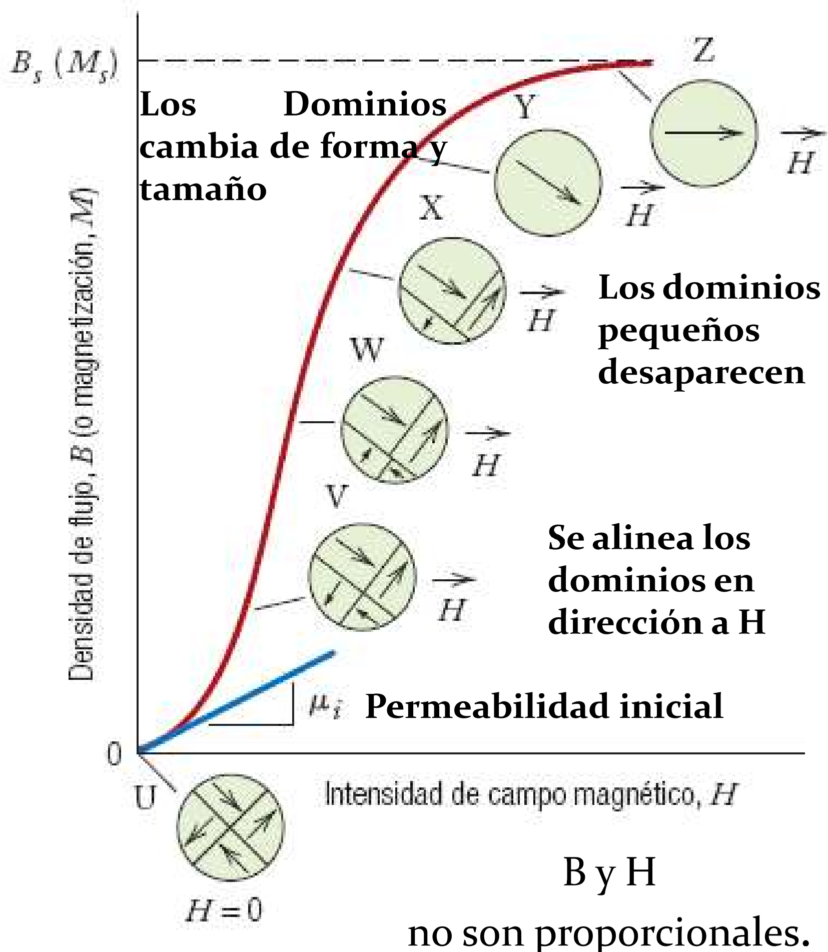


Figura 20.13 El comportamiento de B *versus* H en un material ferromagnético o ferrimagnético que inicialmente estaba desmagnetizado. Se representan las configuraciones de los dominios durante varios estadios de la magnetización. También se indican la densidad de flujo de saturación B_s, la magnetización de saturación M_s y la permeabilidad inicial μ_i. (Adaptada de O. H. Wyatt y D. Dew-Hughes, *Metals, Ceramics and Polymers*, Cambridge University Press).

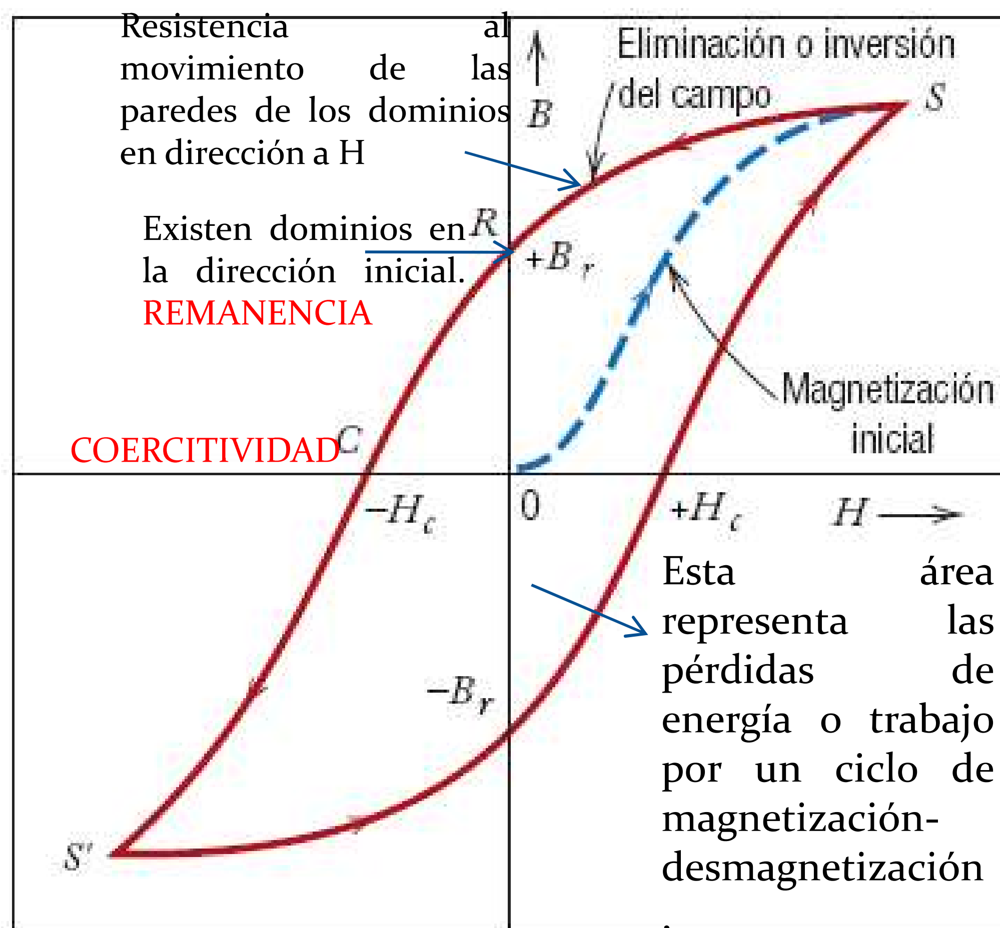


Figura 20.14 Densidad de flujo magnético *versus* la intensidad de campo magnético en un material ferromagnético que está sujeto a la saturación en dirección directa e inversa (puntos S y S'). La curva de histéresis está representada por la línea continua roja; la línea segmentada azul indica la magnetización inicial. También se indican la remanencia B_r y la fuerza coercitiva H_c.

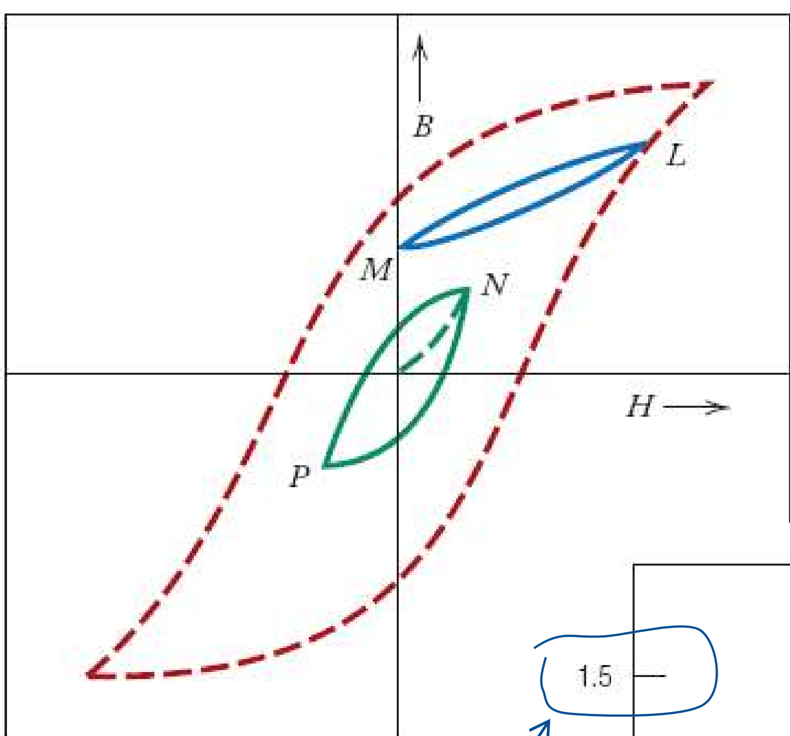


Figura 20.15 Una curva de histéresis sin llegar a la saturación (curva *NP*) dentro del ciclo de saturación en un material ferromagnético. El comportamiento *B*-*H* con la inversión del campo sin llegar a la saturación se indica por la curva *LM*.

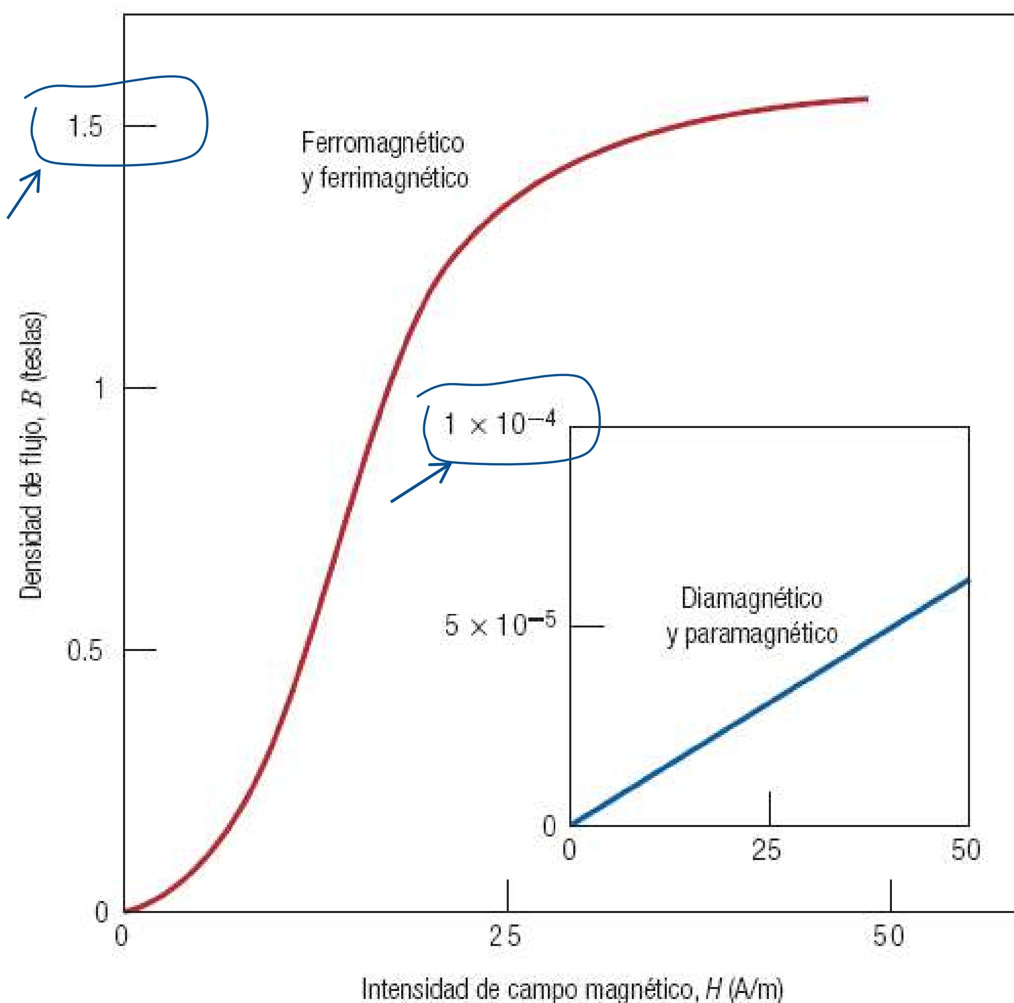


Figura 20.16 Comparación del comportamiento de *B versus H* en materiales ferromagnéticos/ferrimagnéticos y diamagnéticos/paramagnéticos (gráfica en el inserto). Como puede observarse, se generan campos *B* muy pequeños en materiales que experimentan solamente comportamiento diamagnético/paramagnético, razón por la cual se les considera no magnéticos.

ANISOTROPIA

Existen una dirección cristalográfica en la cual la magnetización es mas fácil, ósea que la magnetización se alcanza con un campo H mas bajo; MAGNETIZACIÓN FÁCIL

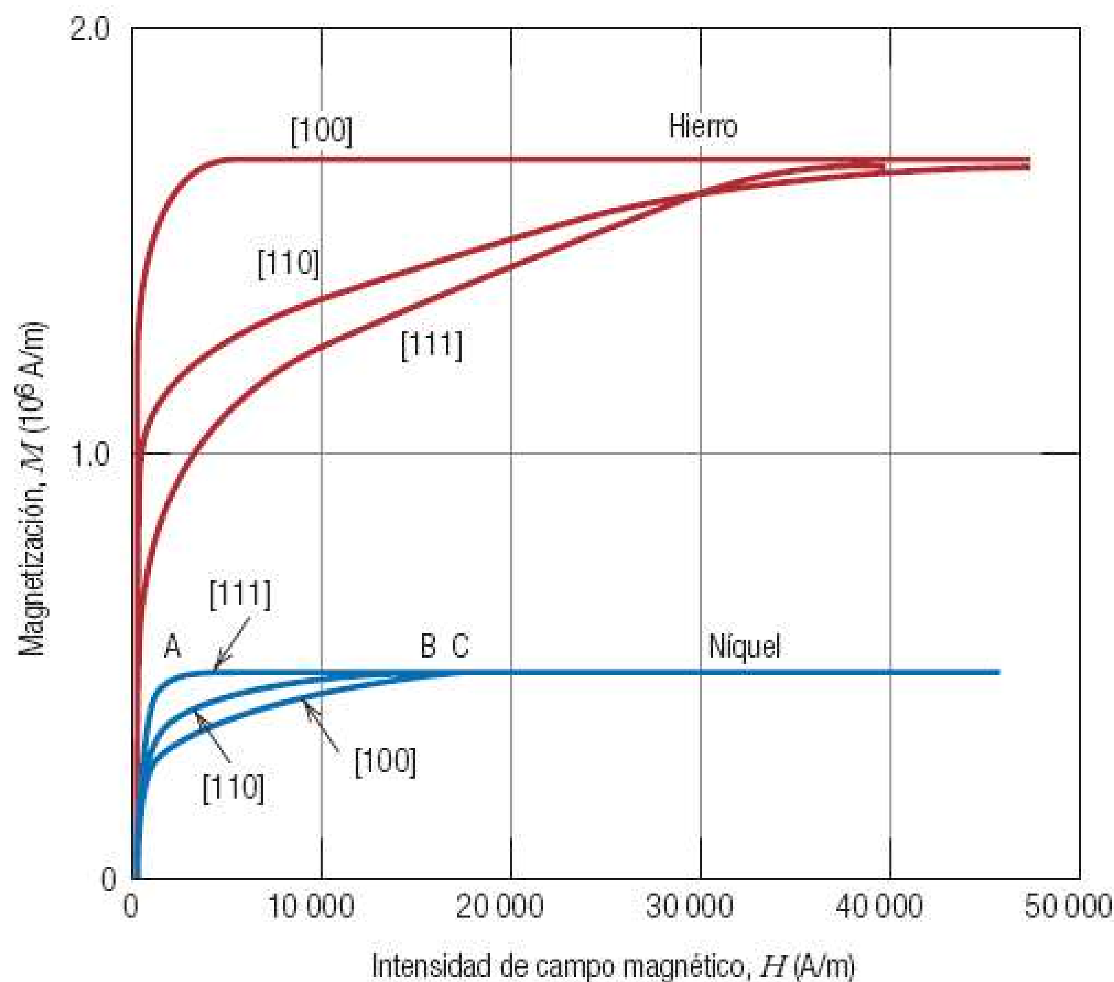


Figura 20.17 Curvas de magnetización para monocristales de hierro y níquel. En ambos metales se generó una curva diferente cuando se aplicó el campo magnético en cada una de las direcciones cristalográficas [100], [110] y [111]. [Adaptada de K. Honda y S. Kaya, "On the Magnetisation of Single Crystals of Iron", *Sci. Rep. Tohoku Univ.* **15**, 721 (1926); y de S. Kaya, "On the Magnetisation of Single Crystals of Nickel", Sci. Rep. *Tohoku Univ.*, **17**, 639 (1928).]

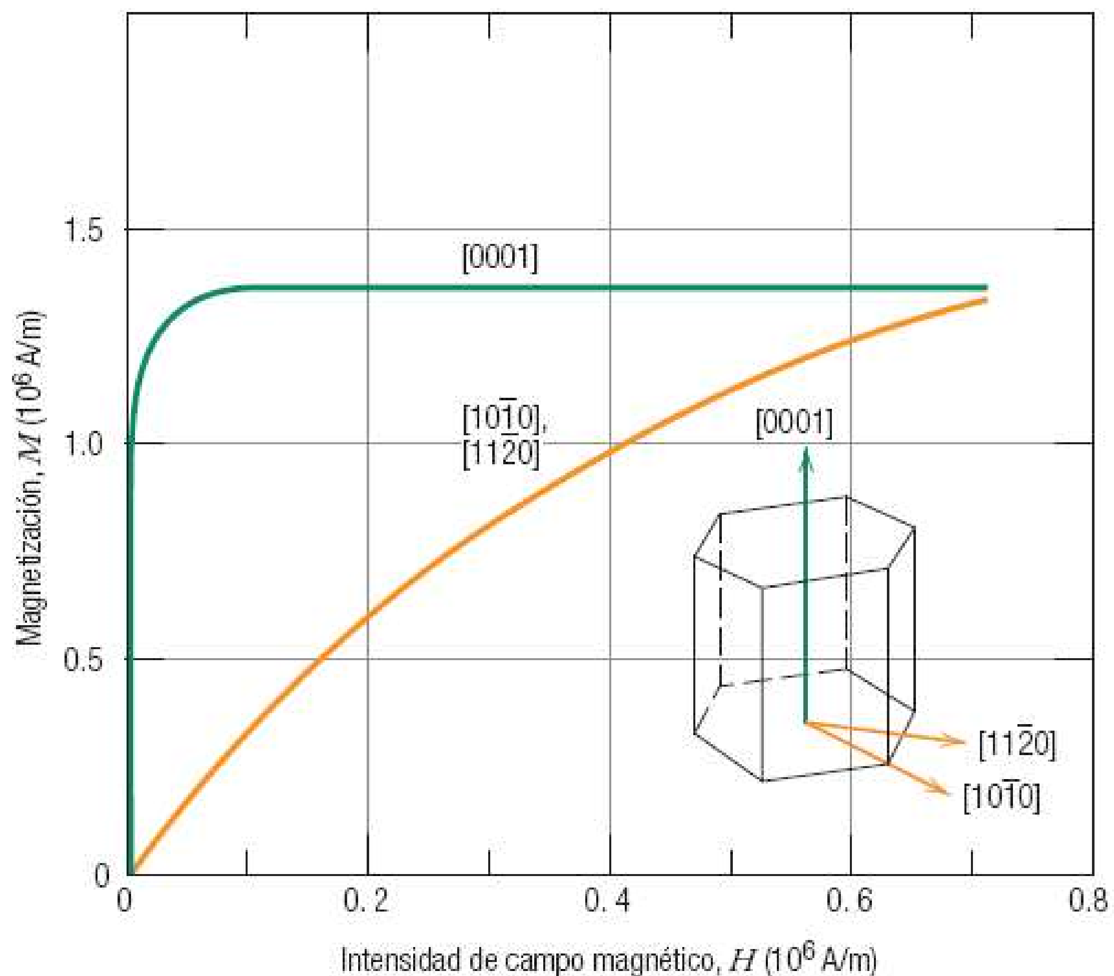


Figura 20.18 Curvas de magnetización para monocristales de cobalto. Las curvas se generaron cuando se aplicó el campo magnético en las direcciones cristalográficas [0001] y [10$\bar{1}$0]/[11$\bar{2}$0]. Tomado de S. Kaya, "On the Magnetisation of Single Crystals of Cobalt", *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, **17**, 1157 (1928).]

MATERIALES MAGNETICOS BLANDOS

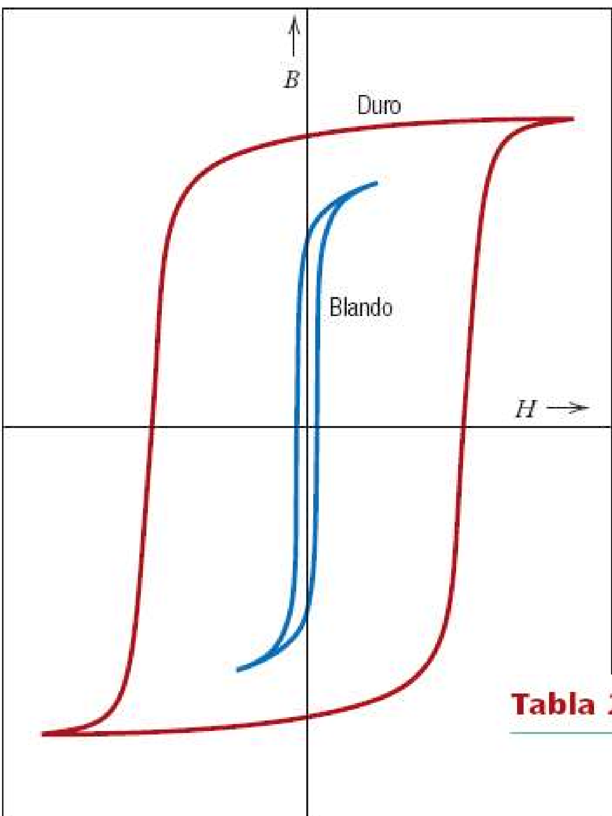


Figura 20.19 Curvas de magnetización de materiales magnéticos blandos y duros. (Tomado de K. M. Ralls, T. H. Courtney y J. Wulff, *Introduction to Materials Science and Engineering*. Copyright © John Wiley & Sons, Nueva York. Reproducido con permiso de John Wiley & Sons, Inc.)

El área dentro de un ciclo representa una perdida de energía magnética que se representa como calor.
Los materiales blandos se usan en dispositivos que usan campos magnéticos alternantes y donde las perdidas de energía deben ser bajas.
Deben tener alta permeabilidad y baja coercitividad.
El campo de saturación de magnetización esta en función de la composición química.
La susceptibilidad y la coercitividad son mas sensibles a variables estructurales. Por ejemplo, defectos como partículas no magnéticas o poros tienen a restringir el movimiento de las paredes de dominio y aumentar la coercitividad.

Tabla 20.5 Propiedades típicas de varios materiales magnéticos blandos

Material	*Composición (% en peso)*	*Permeabilidad inicial relativa* μ_i	*Densidad de flujo de saturación* B_s *[tesla (gauss)]*	*Pérdidas de histéresis/ciclo* $[J/m^3\ (erg/cm^3)]$	*Resistividad* ρ *(Ω-m)*
Hierro comercial moldeado	99.95Fe	150	2.14 (21 400)	270 (2700)	1.0×10^{-7}
Hierro-silicio (orientado)	97Fe, 3Si	1400	2.01 (20 100)	40 (400)	4.7×10^{-7}
Permalloy 45	55Fe, 45Ni	2500	1.60 (16 000)	120 (1200)	4.5×10^{-7}
Supermalloy	79Ni, 15Fe, 5Mo, 0.5Mn	75 000	0.80 (8000)	—	6.0×10^{-7}
Ferroxcube A	$48MnFe_2O_4$, $52ZnFe_2O_4$,	1400	0.33 (3300)	~40 (~400)	2000
Ferroxcube B	$36NiFe_2O_4$, $64ZnFe_2O_4$	650	0.36 (3600)	~35 (~350)	10^7

Fuente: Adaptado de *Metals Handbook: Properties and Selection: Stainless Steels, Tool Materials and Special-Purpose Metals*, vol. 3, 9a edición, D. Benjamin (editor senior), American Society for Metals.

La resistividad de estos materiales debe ser alta. Generalmente se generan corrientes eléctricas o parasitas debido al paso del campo magnético dentro del material. Estas corrientes pueden generar perdidas de energía.

MATERIALES MAGNETICOS DUROS

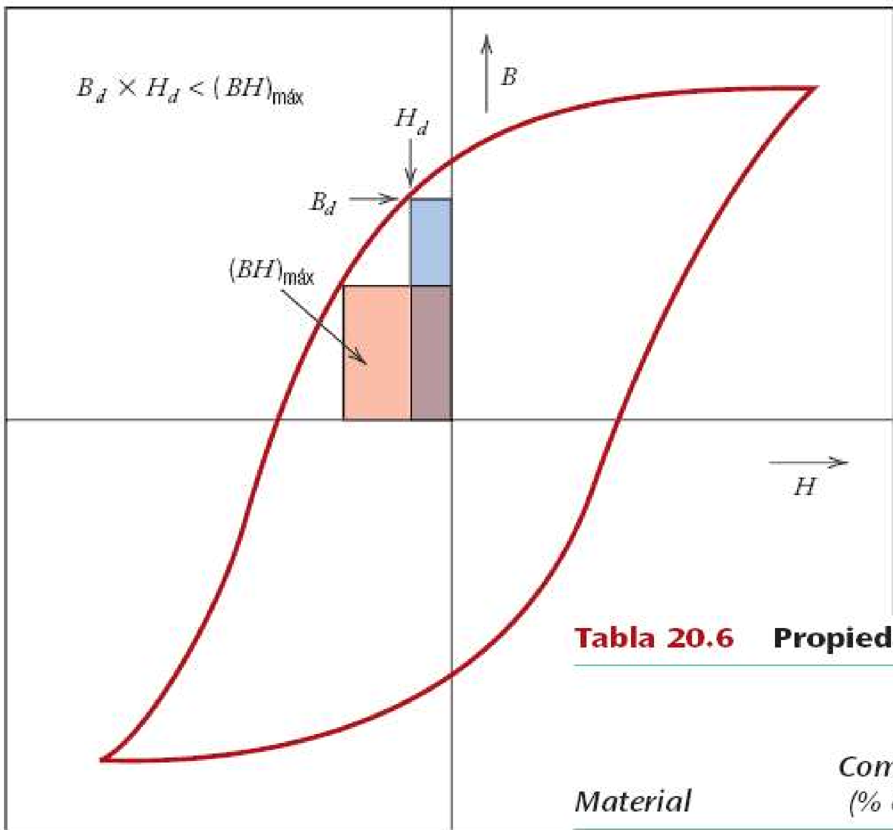


Figura 20.22 Curva de magnetización que presenta histéresis. En el segundo cuadrante se trazan dos rectángulos del producto de la energía *B*-*H*; el área del rectángulo designado $(BH)_{máx}$ es la mayor posible, que es mayor que el área definida por B_d - H_d.

Imanes permanentes

Alta resistencia a la magnetización,
Altos valores de coercitividad , remanencia y densidad de flujo de saturación
Bajos valores de permeabilidad y altas perdidas de energía por histéresis.
Al impedir el movimiento de las paredes de los dominios, se amplifican la coercitividad y la susceptibilidad.

Tabla 20.6 Propiedades típicas de varios materiales magnéticos duros

Material	Composición (% en peso)	Remanencia B_r [tesla (gauss)]	Coercitividad H_c [amp-vuelta/m (Oe)]	$(BH)_{máx}$ [kJ/m³ (MGOe)]	Temperatura de Curie T_c [°C (°F)]	Resistividad ρ (Ω-m)
Acero aleado con tungsteno	92.8 Fe, 6 W, 0.5 Cr, 0.7 C	0.95 (9500)	5900 (74)	2.6 (0.33)	760 (1400)	3.0×10^{-7}
Cunife	20 Fe, 20 Ni, 60 Cu	0.54 (5400)	44 000 (550)	12 (1.5)	410 (770)	1.8×10^{-7}
Alnico 8 sinterizado	34 Fe, 7 Al, 15 Ni, 35 Co, 4 Cu, 5 Ti	0.76 (7600)	125 000 (1550)	36 (4.5)	860 (1580)	—
Ferrita sinterizada 3	$BaO\text{-}6Fe_2O_3$	0.32 (3200)	240 000 (3000)	20 (2.5)	450 (840)	$\sim 10^4$
Tierra rara aleada con cobalto 1	$SmCo_5$	0.92 (9200)	720 000 (9000)	170 (21)	725 (1340)	5.0×10^{-7}
Neodimio-hierro-boro sinterizado	$Nd_2Fe_{14}B$	1.16 (11 600)	848 000 (10 600)	255 (32)	310 (590)	1.6×10^{-6}

Fuente: Adaptada del *ASM Handbook*, vol. 2, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. Copyright © ASM International. Reproducida con permiso de ASM International, Materials Park, OH.

Producto de energía $(BH)_{max}$

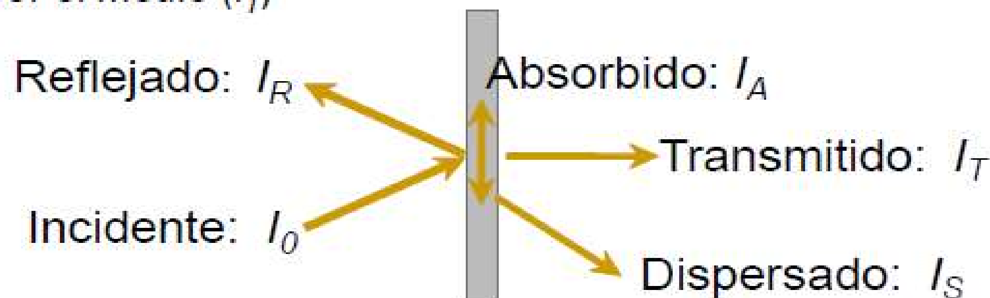
Área del rectángulo mayor en el segundo cuadrante.
Energía requerida para desmagnetizar un imán permanente

kJ/m³ (MGOe)

MGOe = 106 gauss-oersted

Interacción de luz con la materia

Cuando la luz pasa de un medio a otro pueden ocurrir varios fenómenos:
- parte de la luz se transmite por el medio (I_T)
- parte se absorbe (I_A)
- parte se refleja (I_R)



$I_0 = I_T + I_A + I_R$ Donde I_0 es la intensidad del rayo incidente

O bien: $T + A + R = 1$

Donde $T = I_T / I_0$ *es la transmitividad*
$A = I_A / I_0$ *es la absortividad*
$R = I_R / I_0$ *es la reflectividad*

$$A = \alpha lc = -Log_{10}\left(\frac{I_1}{I_0}\right) = -Log_{10}(T)$$

Los materiales pueden ser

- **Transparentes:** transmiten la mayor parte de la luz y tienen poca absorción y reflexión
- **Traslúcidos:** La luz se transmite difusamente, la luz es dispersada en el interior
- **Opacos:** No permiten la transmisión de la luz

Radiación Electromagnética y Material = Polarización electrónica y transiciones de energía de los electrones

Los metales son opacos por que la radiación incidente tiene frecuencias dentro del intervalo visible que excita los electrones hacia los niveles desocupados. La radiación es adsorbida por el metal. Luego parte es reemetida en forma de luz – luz reflejada

Algunas Propiedades

INDICE DE REFRACCIÓN

Desviación

$$n = \frac{c}{v}$$

Es relación de la velocidad de la luz en vacío c y la velocidad de la luz en el medio. Cuando mayor es el índice de refracción, más despacio viaja la luz.

La luz que a traviesa en materiales transparentes presenta una disminución de la velocidad y la velocidad de propagación se desvía en la interfase.

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\sqrt{\epsilon\mu}}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = \sqrt{\epsilon_r\mu_r}$$

Permitividad eléctrica y permeabilidad magnética.

Estaría función de la constante dieléctrica y la permeabilidad magnética.

Tabla 21.1 Índices de refracción de algunos materiales transparentes

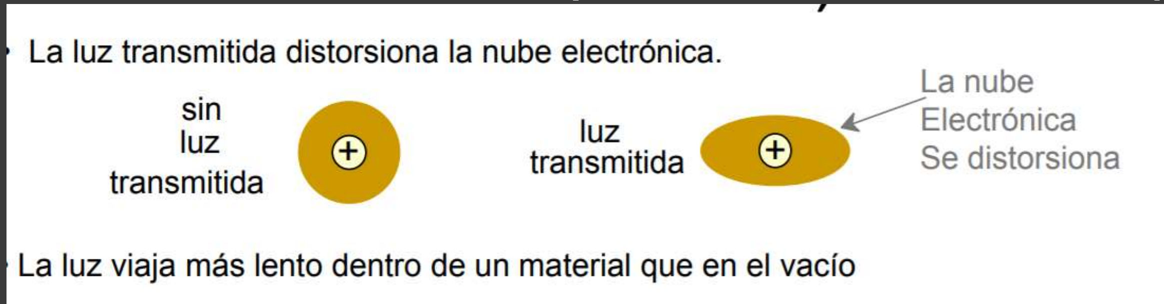
Material	*Índice de refracción promedio*
Cerámicas	
Vidrio de silicato	1.458
Vidrio de borosilicato (Pyrex)	1.47
Vidrio de sosa-cal	1.51
Cuarzo (SiO_2)	1.55
Vidrio óptico (sílex) denso	1.65
Espinela ($MgAl_2O_4$)	1.72
Periclasa (MgO)	1.74
Corindón (Al_2O_3)	1.76
Polímeros	
Politetrafluoroetileno	1.35
Polimetilmetacrilato	1.49
Polipropileno	1.49
Polietileno	1.51
Poliestireno	1.60

El vidrio con oxido de plomo hasta 90% aumenta n hasta 2.1

En general, entre mayor sea un átomo o ion, mayor será la polarización electrónica, menor la velocidad y mayor el índice de refracción.

Vidrios típicos 1.5 -1.7
Plásticos 1.3 -1.6
Diamante 2.41

Refracción (Refractancia)

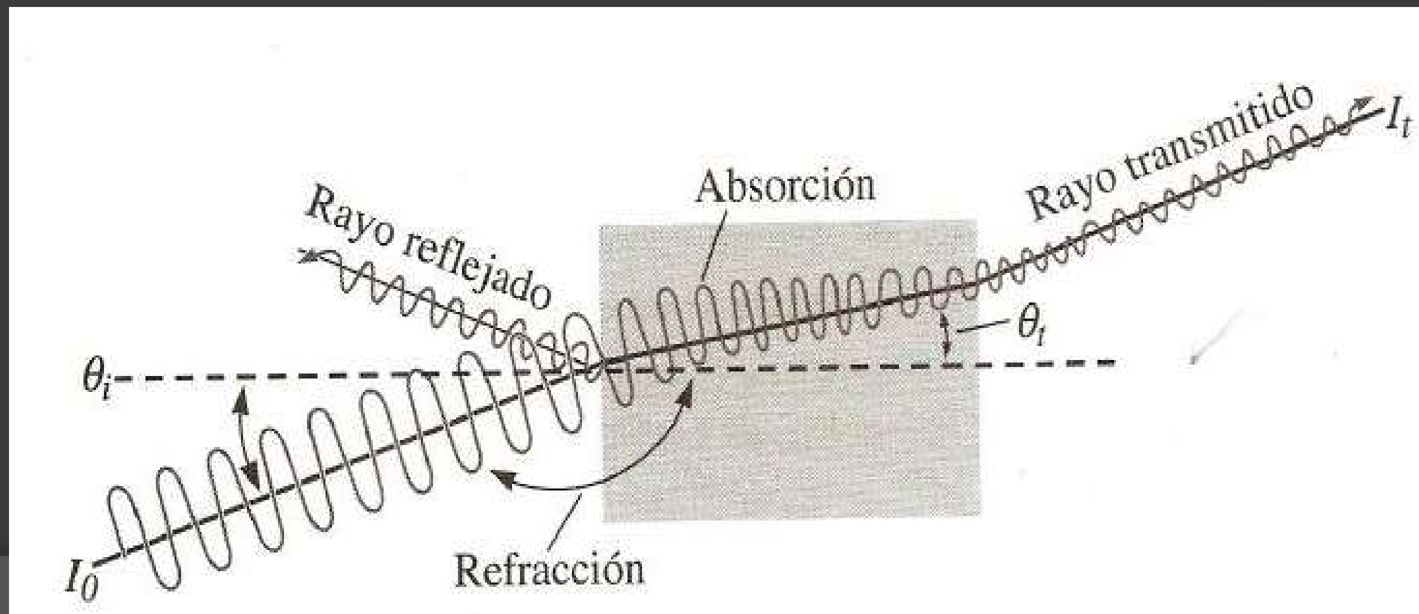


- Polarización de electrones con perdida de energía.
- Causa una inclinación con respecto al rayo incidente

- $$n = \frac{C_0}{C} = \frac{\lambda_{vacio}}{\lambda} = \frac{\sin\theta_i}{\sin\theta_t}$$

La velocidad de propagación de la onda no es la misma en los dos medios.

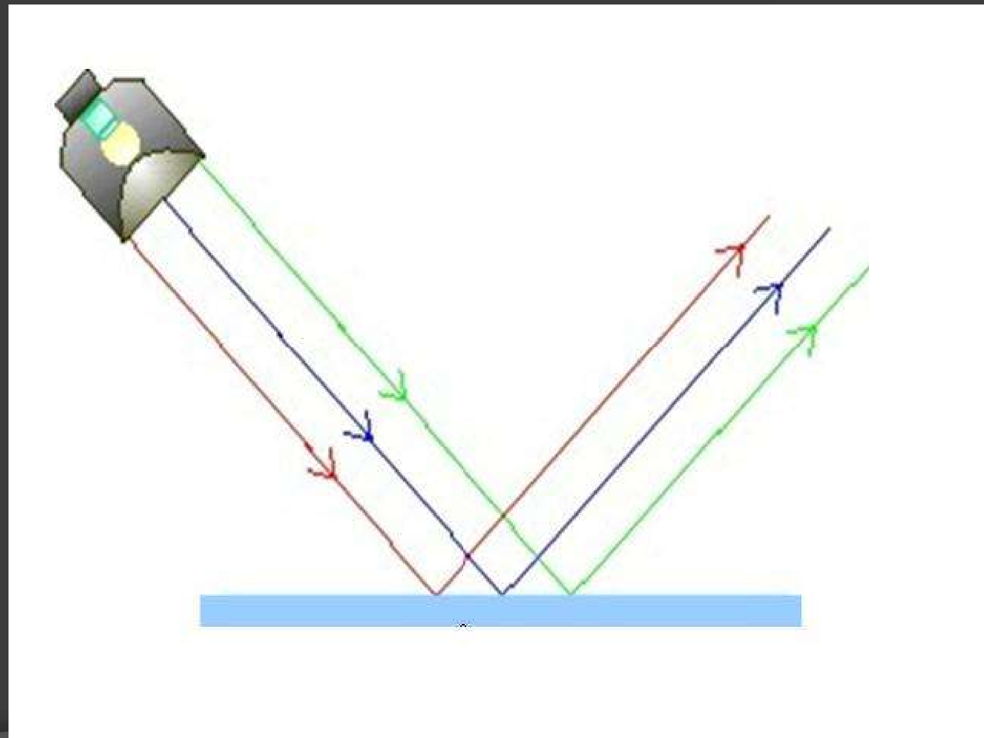
La velocidad de propagación disminuye con la mayor polarizabilidad de los átomos en un medio.



Reflexión (Reflectancia)

- Un rayo incidente en un material se refleja según su índice de refracción.
- $R = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$

$$R = \frac{Ir}{Io}$$



Cuanto mayor es el índice de refracción, mayor es su reflectividad.

Absorción (Absorbancia)

- Es aquella porción del rayo que se retiene en el material y redistribuida en el mismo.

$A = \alpha\, l\, c$ *A es la absorbancia*

α es el coeficiente de adsorción

l es la longitud atravesada por la luz en el medio o paso óptico

c es la concentración del absorbente en el medio

- $I = I_0 e^{-\alpha x}$

Mecanismos de absorción:

- Dispersión de Rayleigh
- Dispersión de Compton
- Efecto Foto electrónico

- $A = -Log(10)\ \frac{Ii}{Io}$

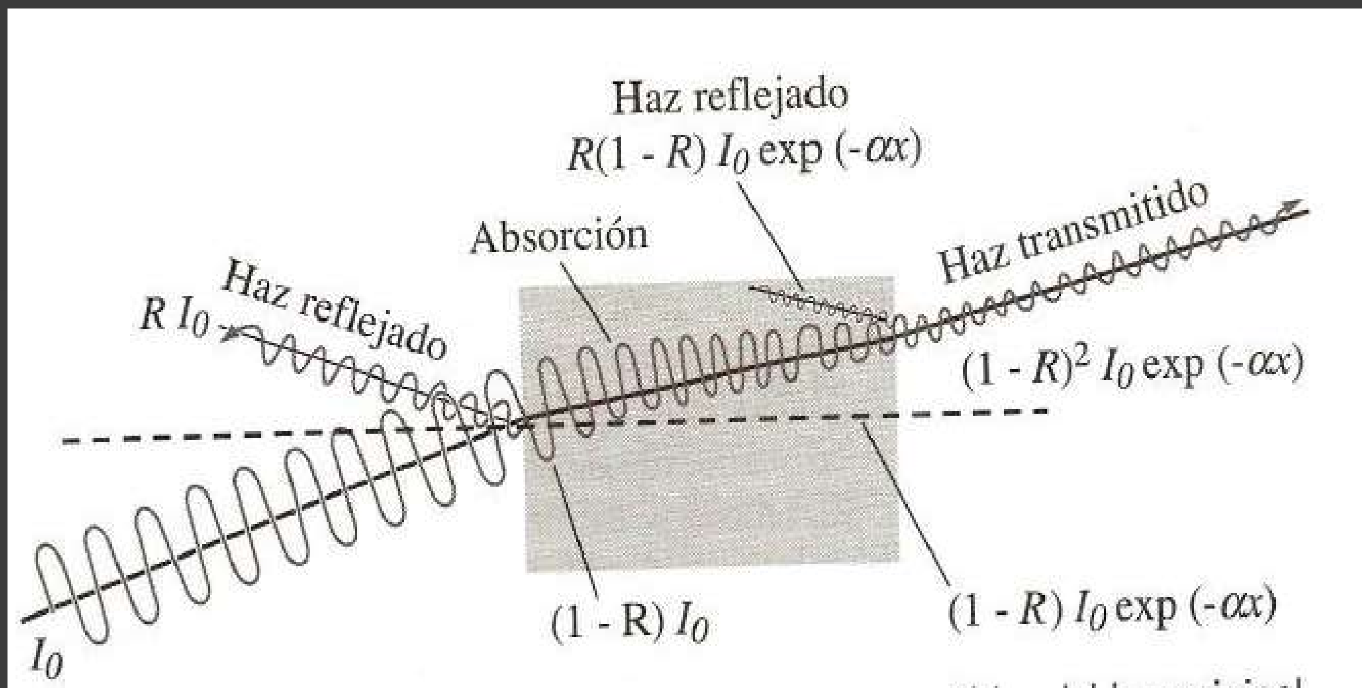
Coeficiente de extinción: Probabilidad de que la energía de un fotón sea extinguida, es decir, adsorbida y no devuelta en forma de energía luminosa.

Coeficiente de absorción: Probabilidad de que la energía de un fotón sea absorbida por una muestra sin preocuparse si esta energía será o no devuelta en forma luminosa.

Ii y Io son las intensidades saliente y entrante respectivamente.

Transmisión (Transmitancia)

- La fracción del haz que no es reflejada o absorbida se transmite a través del materia
- La Transmisión se relaciona con la absorción de los fotones incidentes por los átomos del material y su posterior reemisión en todas las direcciones
- $I_t = I_o(1-R)^2 e^{-\alpha x}$

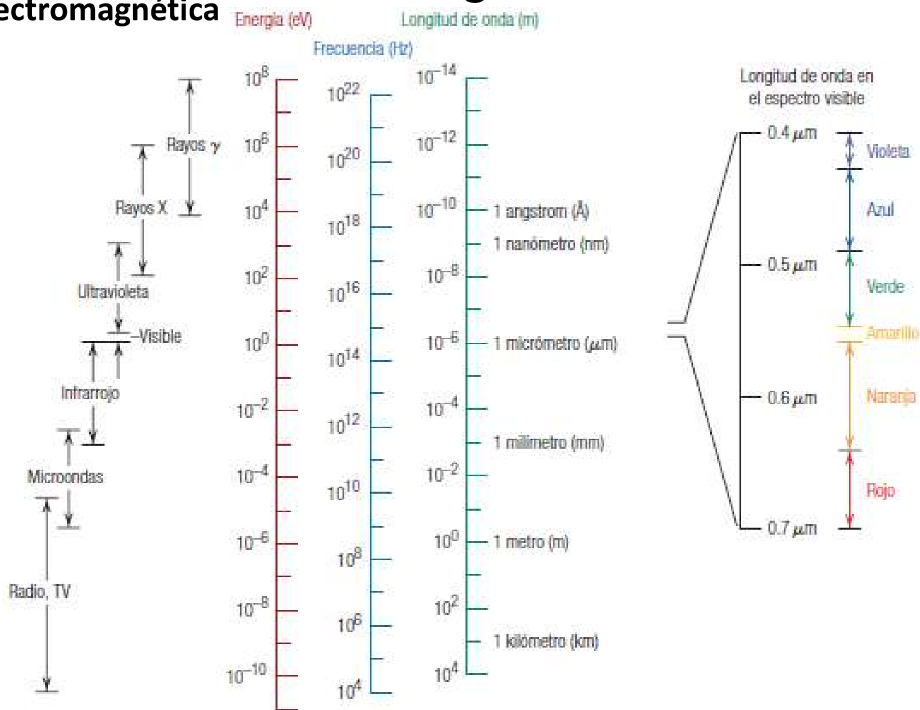


http://www.iim.unam.mx/mbizarro/Propiedades%20opticas.pdf

POR QUE LOS VIDRIOS SON TRANSPARENTES ?

Los metales son opacos por que la radiación incidente tienen valores de frecuencia que logran excitar los electrones a los estados desocupados

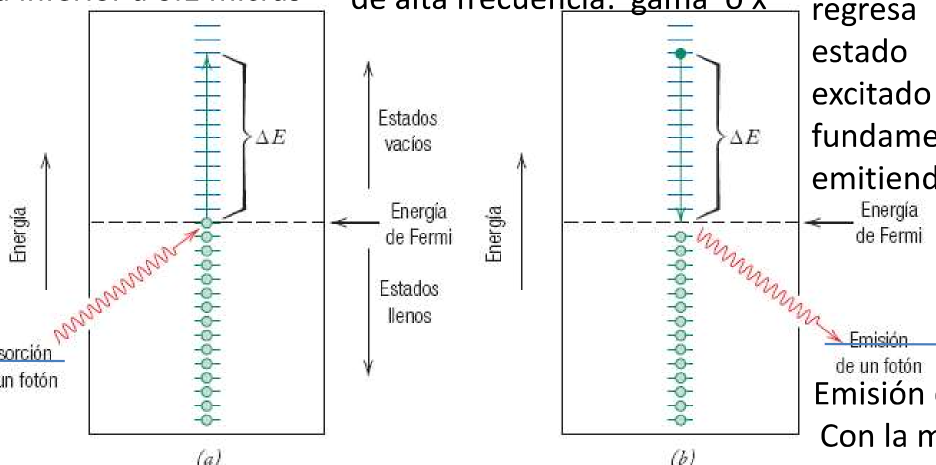
Radiación electromagnética



La adsorción se da en una capa inferior a 0.1 micras

Los metales son transparentes a la radiación de alta frecuencia: gama ó x

El electrón excitado regresa a un estado No excitado o fundamental emitiendo luz

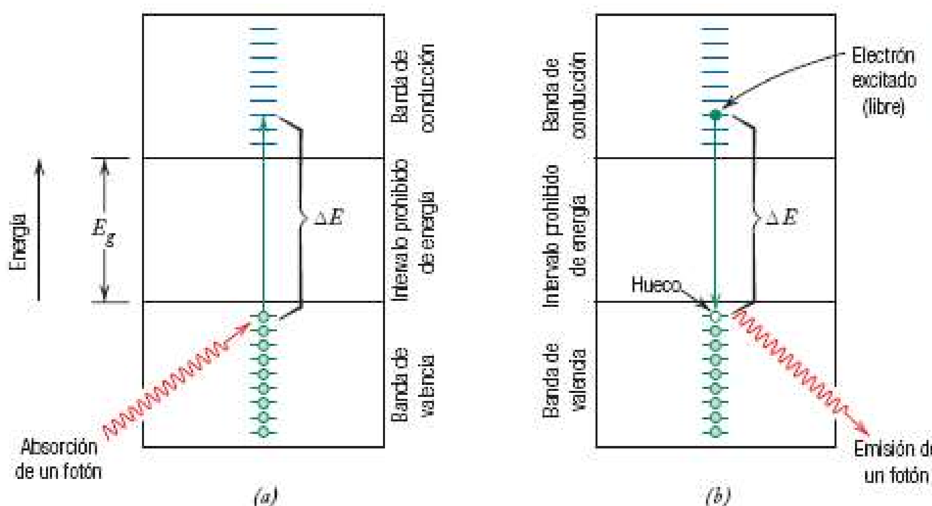


Emisión de luz Con la misma longitud de onda

Figura 21.4 (*a*) Representación esquemática del mecanismo de absorción de un fotón en los materiales metálicos. Un electrón es excitado hasta un estado de energía más alto no ocupado. El cambio de energía ΔE del electrón es igual a la energía del fotón. (*b*) Reemisión de un fotón de luz por transición directa de un electrón desde un estado de energía elevado a otro inferior.

La adsorción de la luz se genera si la energía del fotón es mayor que el valor de la brecha prohibida

Figura 21.5 (*a*) Mecanismo de absorción de un fotón en materiales no metálicos, según el cual un electrón es excitado a través del intervalo prohibido, dejando atrás un hueco en la banda de valencia. La energía del fotón absorbido es ΔE, que necesariamente es mayor que la energía E_g del intervalo prohibido. (*b*) Emisión de un fotón de luz por transición electrónica directa a través del intervalo prohibido.



$$E_g(\text{máx}) = \frac{hc}{\lambda(\text{mín})}$$

$$= \frac{(4.13 \times 10^{-15}\ \text{eV-s})(3 \times 10^{8}\ \text{m/s})}{4 \times 10^{-7}\ \text{m}}$$

$$= 3.1\ \text{eV}$$

La luz visible no es adsorbida por los no metales que tengan intervalos prohibidos de energía mayores a 3.1 eV

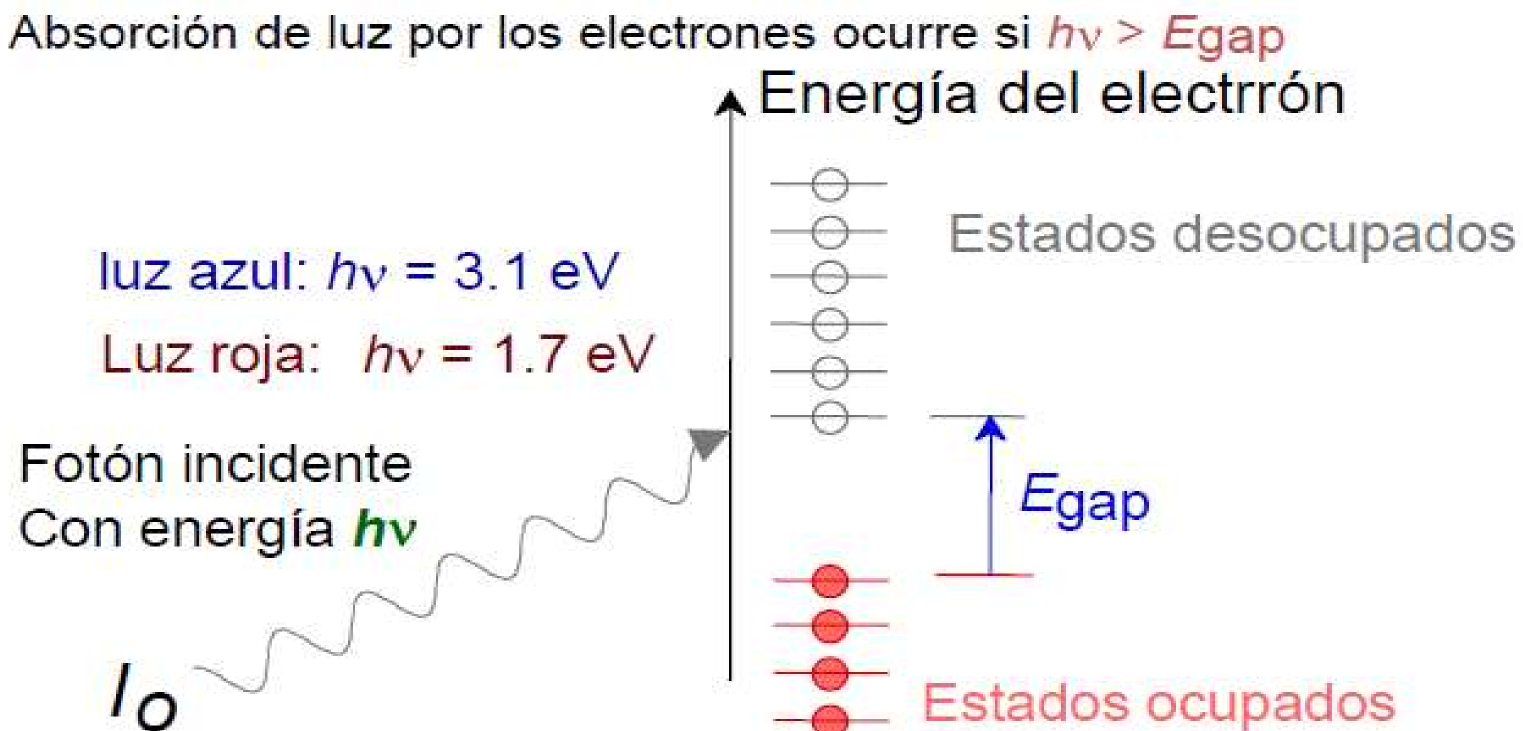
Puede existir gradientes en el índice de refracción

Existen múltiples dispersiones y refracciones que sufre El haz en su recorrido:

- **Límites de grano (produce refracción)**
- **Materiales bifásicos o una segunda fase**
- **Poros**
- **Límites de regiones cristalinas en materiales amorfos**
- **Muestras altamente cristalinas tienen alto grado de dispersión**
- **Materiales poliméricos amorfos son transparentes**

Color

- SEMICONDUCTORES

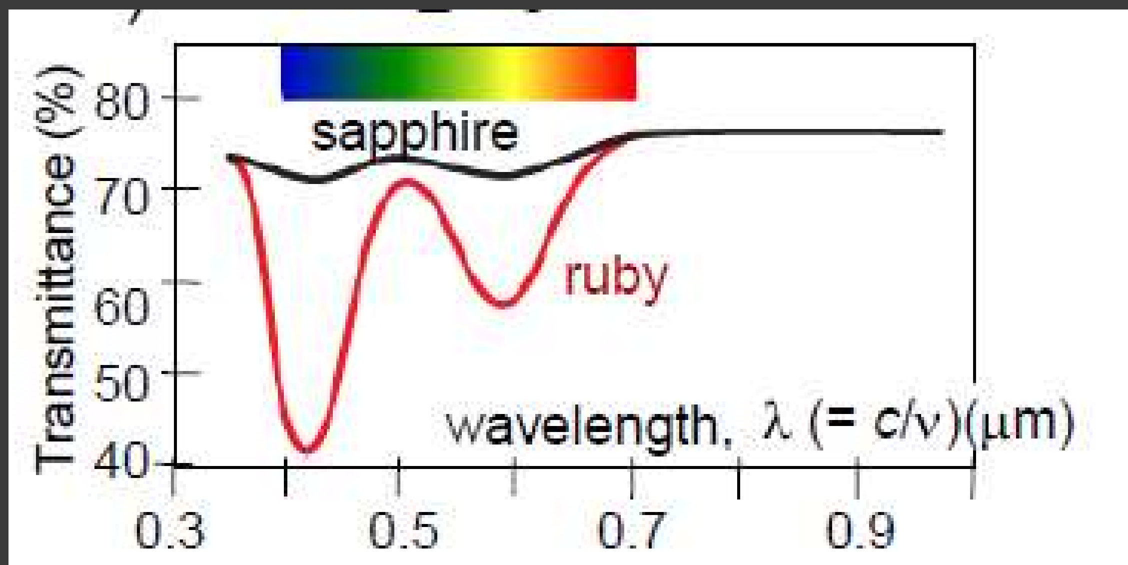


Cuando refleja todos los colores del espectro, el objeto parece blanco

Si cuerpo absorbe todos los colores contenidos en la luz blanca: Es negro

COLOR

CdS (Sulfuro de Cadmio – NO METAL)El color resulta de la combinación de las longitudes de onda transmitidas y remitidas. Tiene un gap de 2.4 eV. Adsorbe en luz visible violeta y azul, es decir absorbe fotones con energías superiores a 2.4 eV. Parte de esta luz será irradiada como luz con otra frecuencia y otra parte será extinguida. La luz no adsorbida será entre 1.59 y 2.4 eV. Rta. El color amarillo -Naranja se da por la composición del haz transmitido-reflejado.



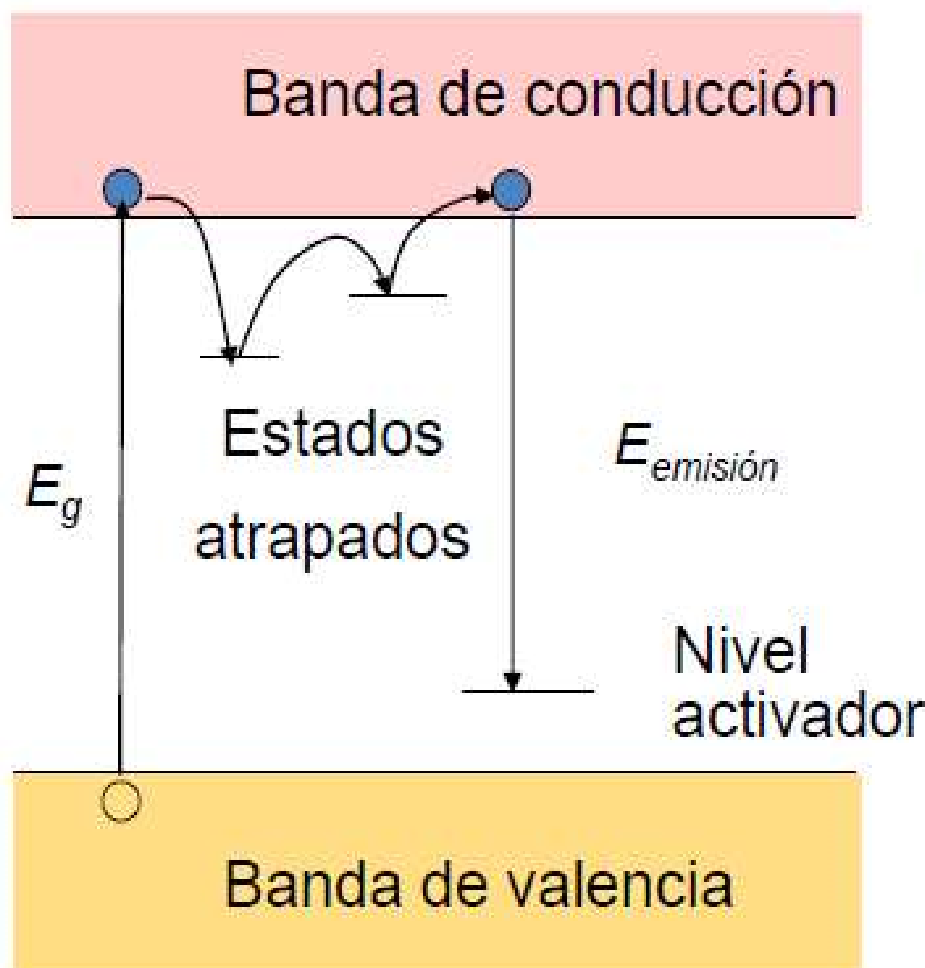
El zafiro y 0.5- 2 % de oxido de cromo. El zafiro es transparente (gap 3.1 eV). Con oxido de cromo se forma el RUBI, se altera el gap, absorbe en el azul y el rojo es trasmitido.

El Rubí es de color Rojo.

La opacidad resulta cuando la dispersión es tan grande que ningún rayo incidente se transmite a la superficie opuesta.

Luminiscencia

- Luminiscencia – emisión de luz por un material
  - El material absorbe luz a una frecuancia y emite a otra frecuencia menor



Capacidad que experimentan algunos materiales, absorben energía y volver a emitirla en forma de luz visible

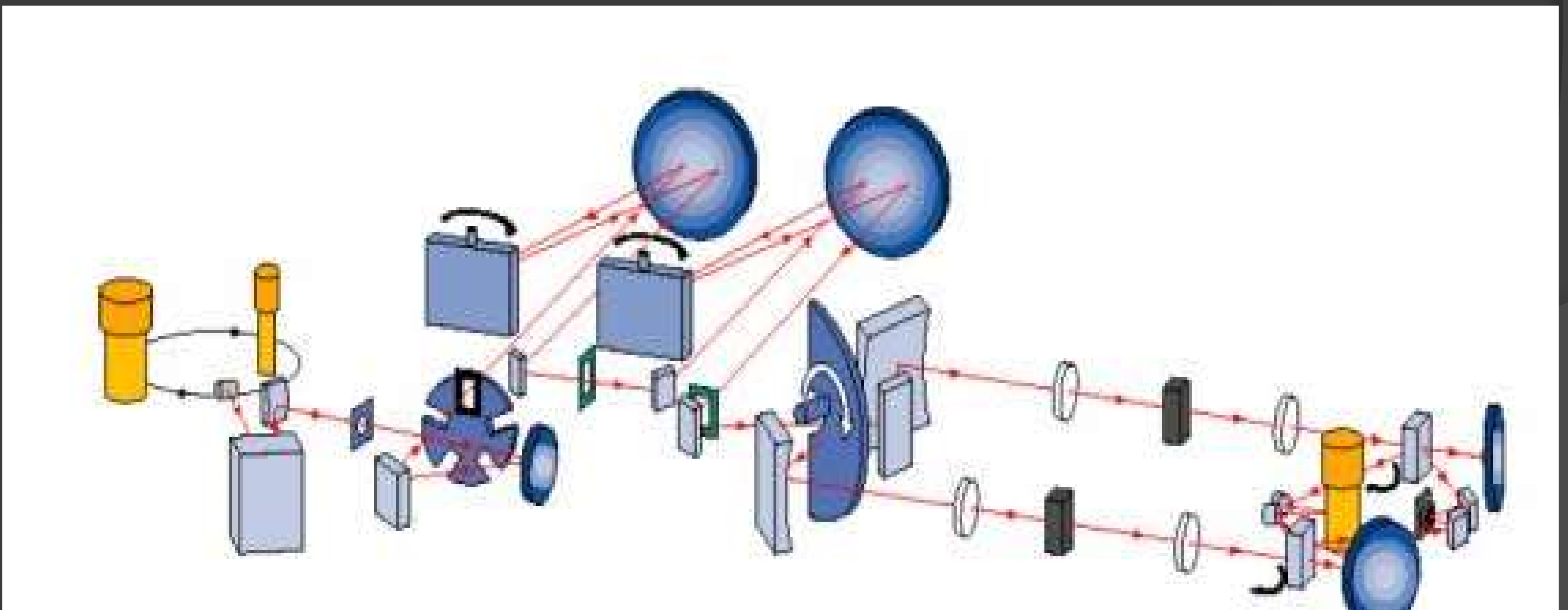
Qué tan estable es el estado atrapado?

- Si es muy estable (vida larga = $>10^{-8}$ s) = fosforescencia
  Emisión de luz mayor a 1 segundo
- Si es menos estable ($<10^{-8}$ s) = fluorescencia
  Emisión de luz menor a un segundo.

Ejemplo: juguetes que brilan en la oscuridad. Se cargan exponiendolos a la luz. Reemiten durante un tiempo -- fosforescencia



- Indice de refracción: n (dirección)
- Coeficiente de absorción: α (atenuación)



PROPIEDADES TÉRMICA DE LOS MATERIALES

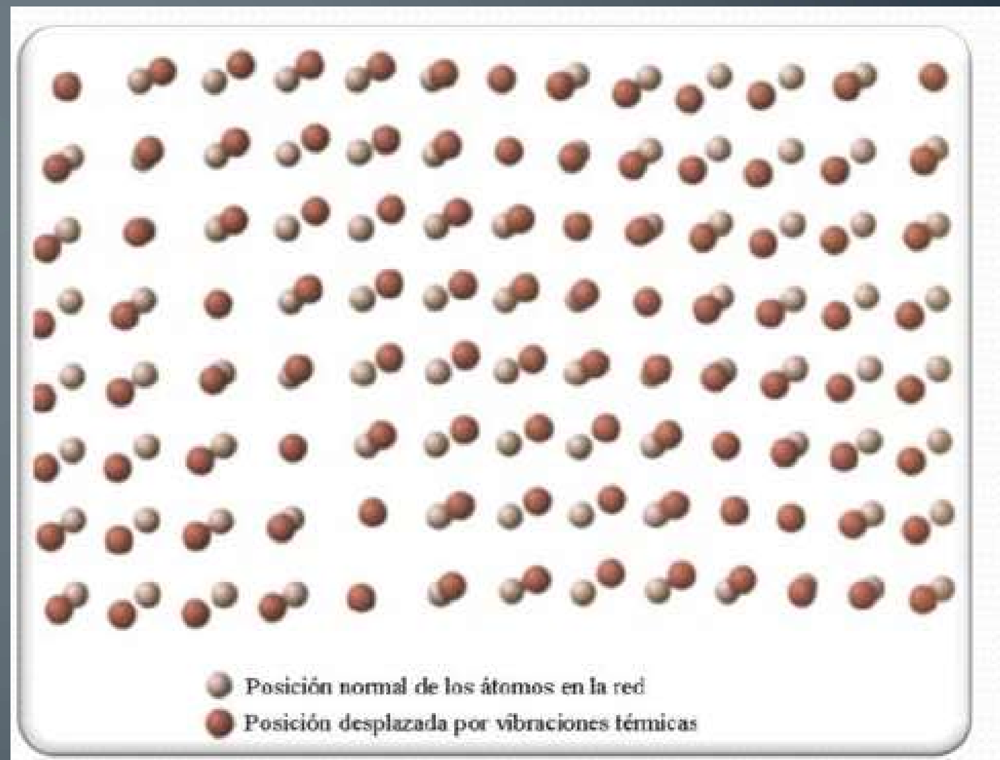
Se relacionan con la capacidad de almacenar calor, la velocidad con que se puede transferirse y los cambios dimensionales debido a las cambios de temperatura

La energía térmica se transmite por medio de fonones, los cuales son ondas elásticas que transfieren energía a través de un material.

Fonon: Modo cuantizado vibratorio existente en las redes cristalinas de un material

El fonòn tiene comportamiento dual: Se comporta como onda y particula. Se caracteriza por su energìa, longitud de onda y frecuencia, E=hv.

Amplitud y frecuencia.
Los átomos ligeros unidos por enlaces fuertes vibran rápidamente, mientras que átomos pesados con enlaces débiles vibran mas despacio.



Los átomos vibran como resultado de la energía térmica

PROPIEDADES TÉRMICA DE LOS MATERIALES

Las propiedades térmicas de los materiales se puede explicar por el movimiento de los átomos: Vibraciones- Fonones

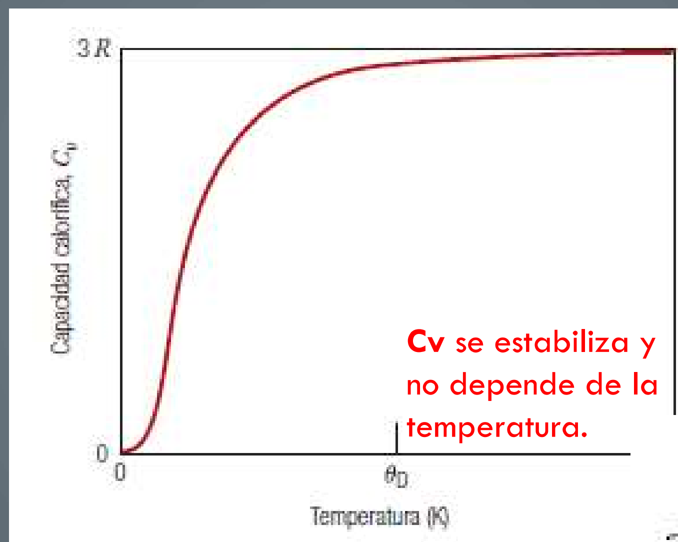
Vibración de los átomos: ondas elásticas: esta energía se mide en fonones

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

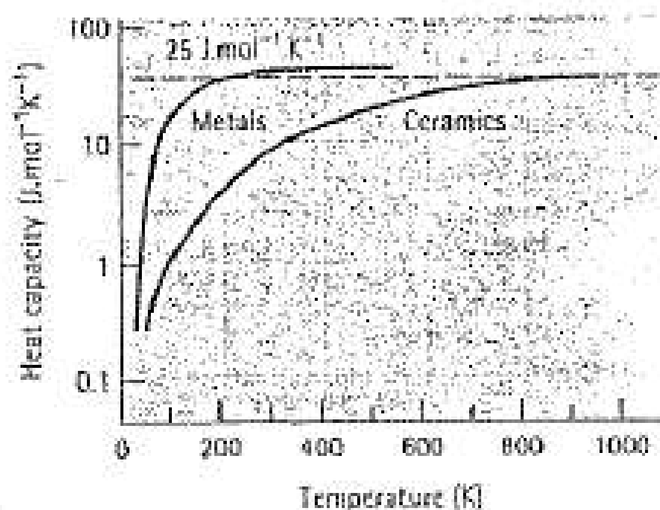
CAPACIDAD CALORÍFICA

Cuanto Calor puede Absorber un material en su entorno

Cantidad de energía necesaria para producir un aumento unitario de la temperatura



Algunos materiales, metales por ejemplo, mantienen las bajas temperaturas. Otros, como las maderas mantienen las altas temperaturas.



Capacidad calorífica a presión constante Cp: energía necesaria para aumentar la temperatura en un grado, sin variar la presión

Es la energía necesaria para experimentar cambios en la temperatura de una mol de cierto material para elevarlos una unidad de temperatura.

CALOR ESPECIFICO

El calor especifico, c, es la capacidad calorífica por unidad de masa

- Es la cantidad de calor que se debe aplicar para elevar la temperatura 1° a cierta masa de un material.

VALORES DE CALOR ESPECÍFICO PARA DISTINTOS MATERIALES

T = 25°C

MATERIAL	c_p ($Jkg^{-1}K^{-1}$)	c_p ($Jmol^{-1}K^{-1}$)	MATERIAL	c_p ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
Metales			Cerámicos	
Aluminio	900	24.2	Al_2O_3	160
Cobre	385	24.47	MgO	457
Oro	129	25.42	SiC	344
Hierro	444	25.1	Diamante (C)	519
Plomo	159		Grafito (C)	711
Niquel	444		Polímeros	
Plata	237		Nylon 66	1260 – 2090
Titanio	523		Fenólicos	1460 – 1670
Wolframio	133		Polietileno	1920 – 2300
Agua			Polipropileno	1880
Gas a 100ºC	2080	37.47	Politetrafluoretileno	1050
Líquido a 25ºC	4181	75.327		
Sólido a 0ºC	2114	38.09		

Repasar:

www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion2.PROPIEDADES.TERMICAS.ppt
http://slideplayer.es/slide/1686078/
https://www.youtube.com/watch?v=tyk0x3aMh80

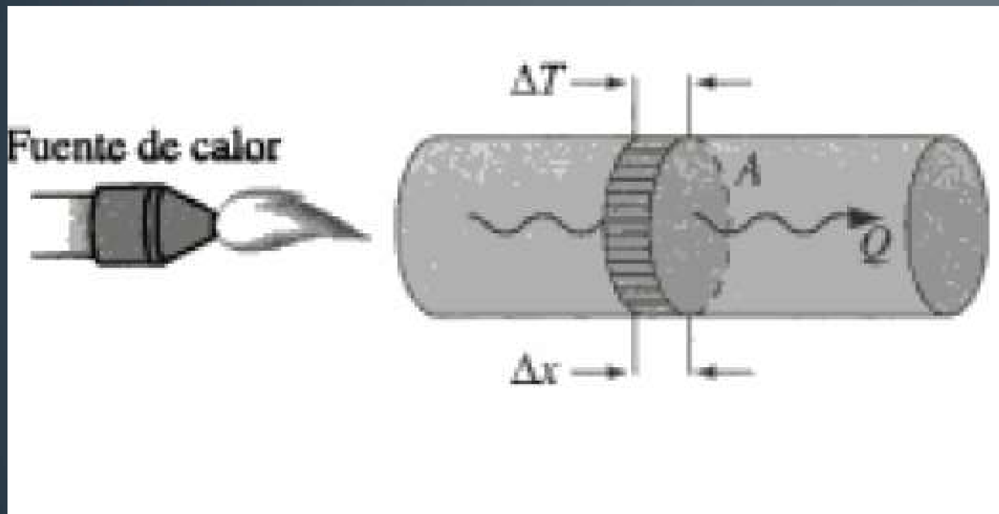
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

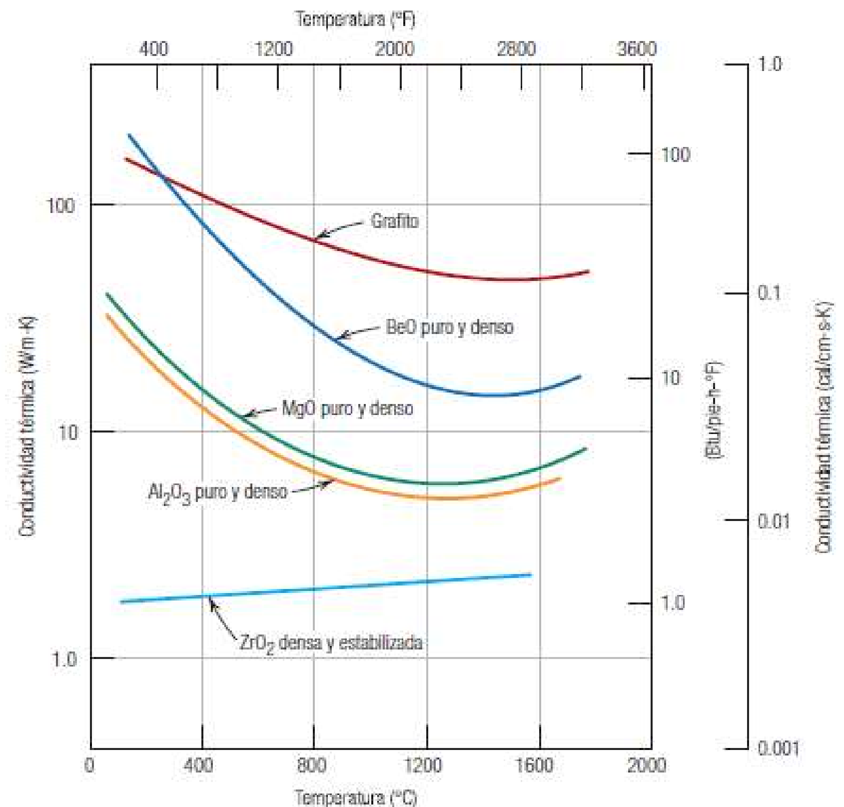
$$q = -k\frac{dT}{dx}$$

- El flujo de calor es proporcional al gradiente térmico y K (J/sKm o W/km)

  Descripción de la transferencia de energía en forma de calor o transferencia calórica.
- La energía térmica es transferida desde regiones de mayor temperatura a las de menor temperatura.
- La energía térmica es transportada por los fonones y los electrones libres.

La conductividad térmica k, mide la cantidad de calor que fluye a través del material, o la rapidez con que el calor se transfiere a través del material.





Hay dispersión de los fonones (vibraciones de la red cristalina) por las imperfecciones de la red. La dispersión es mas efectiva cuando son materiales amorfos, dificultan la transferencia de los fonones. Los poros disminuyen la conductividad térmica.

Los materiales con alta son útiles cuando se desea llevar el calor de un lugar a otro, como en ollas de cocina, radiadores y cambiadores de calor.

Material	Conductividad térmica ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	Material	Conductividad térmica ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
Metales puros:		Materiales cerámicos:	
Ag	430		
Al	238	Al_2O_3	16–40
Cu	400	Carbono (diamante)	2000
Fe	79	Carbono (grafito)	335
Mg	100	Arcilla refractaria	0.26
Ni	90		
Pb	35	Carburo de silicio	hasta 270
Si	150	AlN	hasta 270
		Si_3N_4	hasta 150
Ti	22	Vidrio de cal y sosa	0.96–1.7
W	171	Silice vitreo	1.4
Zn	117	Vidrio Vycor™	12.5
Zr	23	ZrO_2	4.2
Aleaciones:		Polimeros:	
Acero 1020	100	Nylon–6,6	0.25
Aleación aluminio 3003	280	Polietileno	0.33
Acero inoxidable 304	30	Poliimida	0.21
Cementita	50	Poliestireno	0.13
		Espuma de poliestireno	0.029
Cu-30% Ni	50	Teflón	0.25
Ferrita	75		
Fundición de hierro gris	79.5		
Latón amarillo	221		

Nota: $1\ cal/cm \cdot s \cdot K = 418.4\ W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

DIFUSIVIDAD TÈRMICA

- El tiempo para fundir el material ubicado sobre una plancha metálica es inversamente proporcional a la difusividad tèrmica del material de la plancha.

- Éste valor describe cuán rápido un material reacciona a un cambio de temperatura

- Es la capacidad de un material de adaptarse a la temperatura que lo rodea. Entre mas alto el valor, mas rapido se adapta el material a la temperatura ambiente.

- Depende proporcionalmente de la conductividad térmica y es inversamente proporcional al calor específico y a la densidad del material.

- **Difusividad térmica = Conductividad térmica / capacidad calorífica, Cp**

Material	Calor específico[a] Btu/lbm-°F o Cal/g-°C	Conductividad térmica Btu/hr-pulg-°F	(J/seg-mm-°C)
Metales			
Aluminio	0.21	9.75	(0.22)
Hierro fundido	0.11	2.7	(0.06)
Cobre	0.092	18.7	(0.40)
Hierro	0.11	2.98	(0.072)
Plomo	0.031	1.68	(0.033)
Magnesio	0.25	7.58	(0.16)
Níquel	0.105	2.88	(0.070)
Acero	0.11	2.20	(0.046)
Acero inoxidable 18-8	0.11	0.67	(0.014)
Estaño	0.054	3.0	(0.062)
Zinc	0.091	5.41	(0.112)
Cerámicos			
Alúmina	0.18	1.4	(0.029)
Concreto	0.2	0.6	(0.012)
Polímeros			
Resinas fenólicas	0.4	0.0077	(0.00016)
Polietileno	0.5	0.016	(0.00034)
Teflón	0.25	0.0096	(0.00020)
Hule natural	0.48	0.006	(0.00012)
Otros			
Agua (líquida)	1.00	0.029	(0.0006)
Hielo	0.46	0.11	(0.0023)

Recopilada de [2], [3], [6] y otras fuentes. Los valores se dan a temperatura ambiente y cambian a temperaturas diferentes.

[a] El calor específico tiene el mismo valor numérico en Btu/lbm-°F o Cal/g-°C; 1.0 caloría = 4.186 joules.

EXPANSION TÉRMICA

- Cambio dimensional que ocurre en un material al aplicarle temperatura.

$$\frac{l_f - l_0}{l_0} = \alpha_l (T_f - T_0)$$

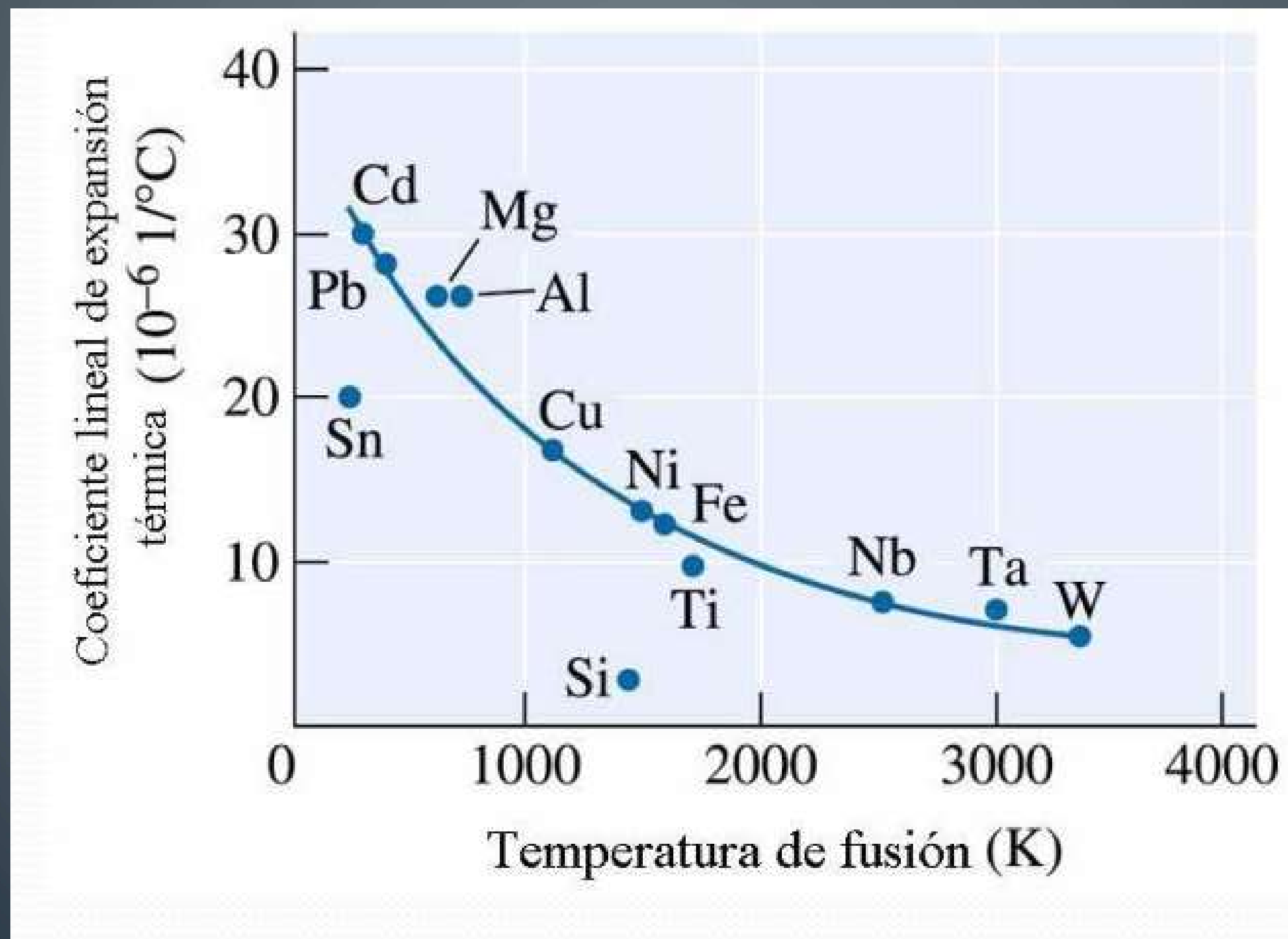
Es un aumento de la distancia interatómica promedio.

Grado de dilatación cuando es calentado

Material	Coeficiente lineal de expansión térmica ($\times 10^{-6}$ 1/0 °C)
Al	25.0
Cu	16.6
Fe	12.0
Ni	13.0
Pb	29.0
Si	3.0
W	4.5
Acero 1020	12.0
Aleación de aluminio 3003	23.2
Fundición de hierro gris	12.0
Invar (Fe-36% Ni)	1.54
Acero inoxidable	17.3
Latón amarillo	18.9
Resina epóxica	55.0
Nylon 6,6	80.0
Nylon 6,6–33% fibra de vidrio	20.0
Polietileno	100.0
Polietileno–30% fibra de vidrio	48.0
Poliestireno	70.0
Al_2O_3	6.7
Sílice fundido	0.55
ZrO_2 parcialmente estabilizado	10.6
SiC	4.3

COEFICIENTE DE EXPANSION TÉRMICO

- Constante que describe la cantidad de cambio del material bajo cambios a nivel térmico.



CHOQUE TÉRMICO

Resistencia al choque térmico

- Falla de un material debido a cambios súbitos de la temperatura

$$TSR \cong \frac{\sigma_f k}{E\alpha_l}$$

Depende de:

Coeficiente de expansión térmico

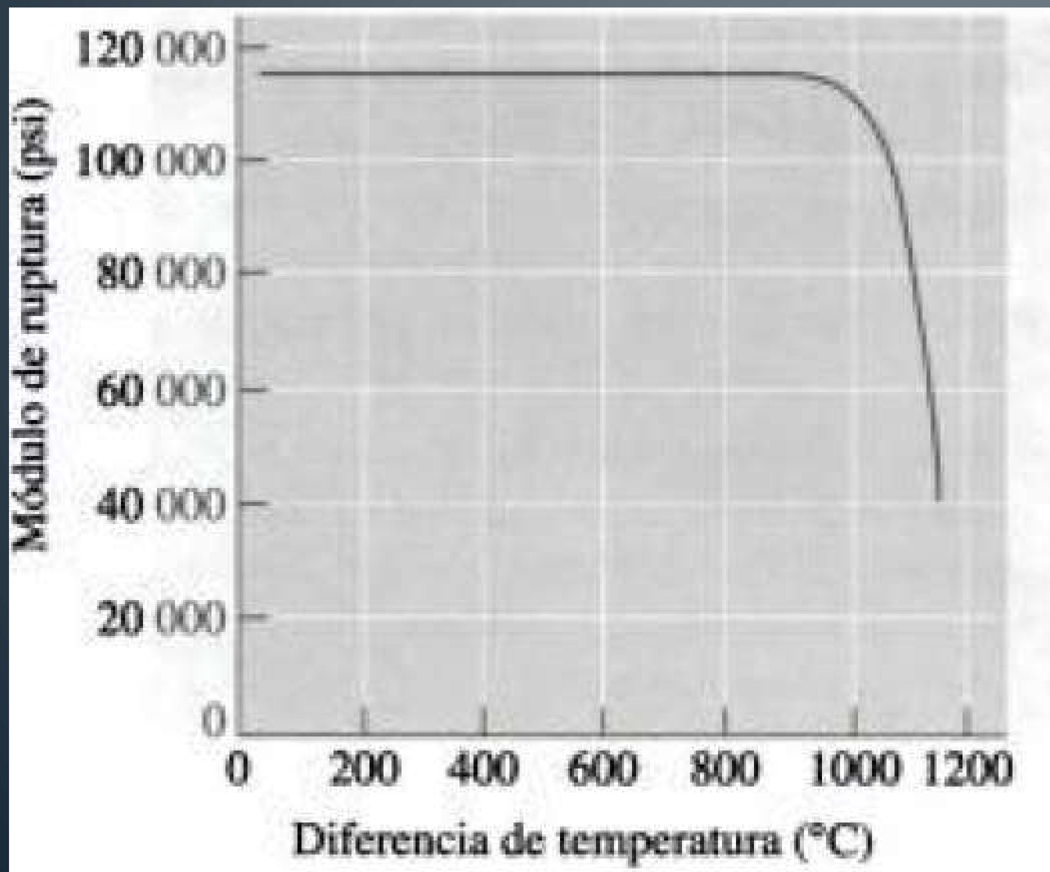
Conductividad térmica

Módulo elástico

Esfuerzo a la fractura

Transformaciones de fase

En el enfriamiento rápido se puede generar la rotura por choque térmico, no en un calentamiento rápido, por que las tensiones superficiales inducidas en el enfriamiento son de TENSIÓN.



ESFUERZO TÉRMICO

Esfuerzos generados por el cambio de temperatura y el material tiene unos apoyos fijos que no le permiten tener movimientos

$$\sigma = E\alpha_f(T_0 - T_f) = E\alpha_f\Delta T$$

- Esfuerzo que se presenta en un material por la elongación o contracción de un material por introducir un cambio de temperatura.

- La temperatura externa cambia más rápidamente que la interna. Los cambios dimensionales diferenciales restringen la libre dilatación o contracción de los elementos de volumen adyacentes dentro de la pieza.

Bibliografía

• ASHBY, MICHAEL F.	Engineering Materials 1 - An introduction to properties, applications and design.	ELSEVIER Pergamon Press. Oxford.	2012
• ASHBY, MICHAEL F.	Engineering Materials 2 - An introduction to microstructures and processing.	ELSEVIER Pergamon Press. Oxford.	2012
• ASHBY, MICHAEL F.	Materials selection in mechanical design.	ELSEVIER Pergamon Press. Oxford.	2005
• MANGONON, PAT L.	Ciencia de materiales.	PRENTICE HALL	2001
• CALLISTER, WILLIAM D.	Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales.	REVERTE	1997
• SMITH WILLIAM F.	Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales	MC GRAW HILL	1999
• AVNER	Introducción a la metalurgia física, Manual de normas	MC GRAW HILL	
• Charles & Crane	Selection and use of engineering materials.	BUTTERWORTH HEINEMANN LTD, WILTSHIRE	1989
• BOLTON	Materials and their uses	BUTTERWORTH HEINEMANN LTD, OXFORD	1996
• EASTERLING	Tomorrow materials.	The institute of metals, London	1988
• MUNZ	Caramic materials: Mechanical properties, failure behaviour and materials selection.	Springer	2001
• BUDINSKI	Engineering materials: properties and selection.	PRENTICE HALL	2004

Bibliografía

Bibliografía actualizada de los siguientes textos:

1. - Ciencia e Ingeniería de Materiales, William Smith
2. - Ciencia i. e ingeniería. de los materiales. Donald Askelan
3. - I n t r o d u c c i ó n a l a Ciencia e Ingeniería de los Materiales. W i l l ik m d C a l l i s t e r
4. Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros para, 6 ta edición, Shackelford
5. - Introducción a la Física del Estado Sólido, Charles Kittel
6. - Introducción a la Metalurgia Física. Sydney Avner

Bibliografía complementaría:

http://www.iim.unam.mx/mbizarro/Propiedades%20opticas.pdf

Ciencia e Ingeniería de los Materiales, J.M. Montes, F.G. Cuevas, J. Cintas, 1ra edición, 2014.

DIAGRAMAS DE TRANSFORMACIÓN ISOTÉRMICA



PERLITA


$$\gamma(0.76 \text{ wt\% C}) \underset{\text{heating}}{\overset{\text{cooling}}{\rightleftharpoons}} \alpha(0.022 \text{ wt\% C}) + Fe_3C(6.70 \text{ wt\% C})$$

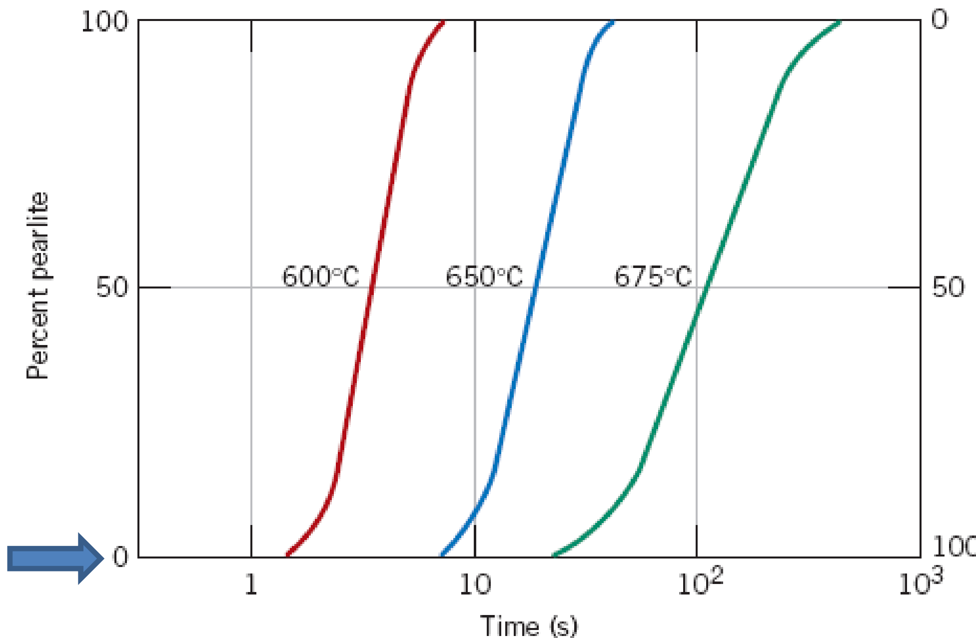
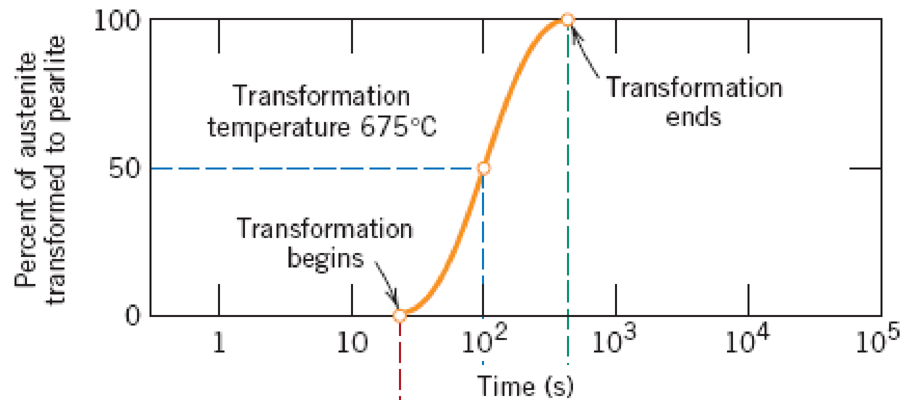


Figure 10.12 For an iron–carbon alloy of eutectoid composition (0.76 wt% C), isothermal fraction reacted versus the logarithm of time for the austenite-to-pearlite transformation.

El tiempo para que inicie y termine la transformación depende la temperatura isotérmica

1. Desde la temperatura de austenización se enfría rápido, es decir, hay un sub-enfriamiento hasta una temperatura en la región de ferrita y perlita
2. En un horno de sales se mantiene la pieza a una temperatura constante , pero a diferentes tiempos se enfría y se caracteriza la microestructura.



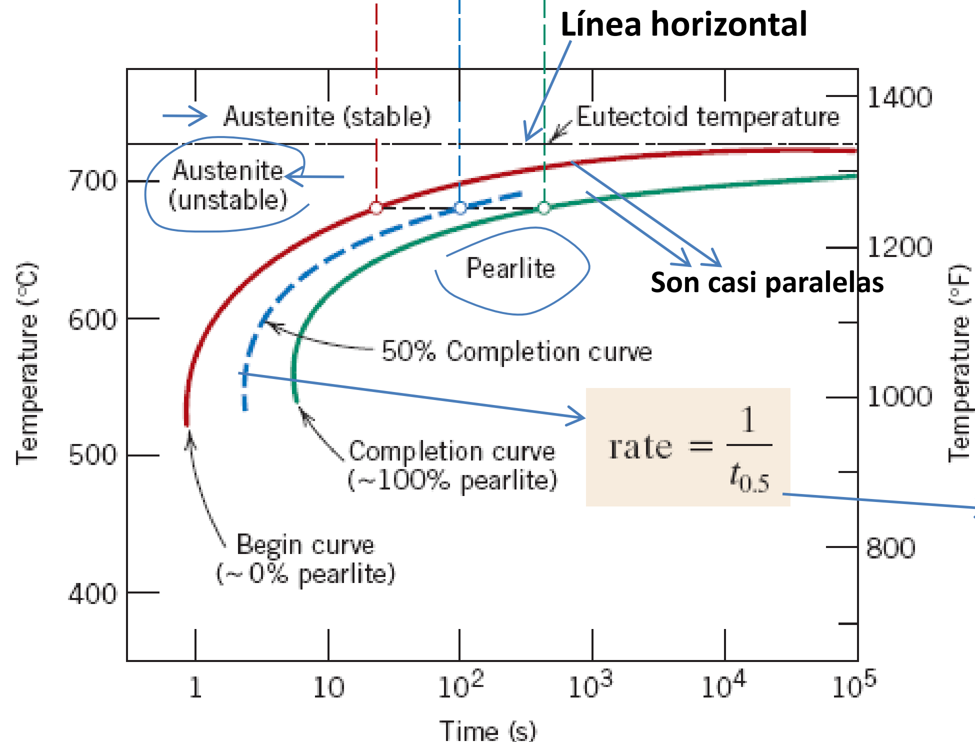


Figure 10.13 Demonstration of how an isothermal transformation diagram (bottom) is generated from percentage transformation-versus-logarithm of time measurements (top). [Adapted from H. Boyer, (Editor), *Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams*, American Society for Metals, 1977, p. 369.]

DIAGRAMA DE TRANSFORMACIÓN ISITERMICA : TRANSFORMACIÓN –TIEMPO-TEMPERATURA (TTT)

----No son fáciles de hacer-----

Revise el tratamiento ABCD:

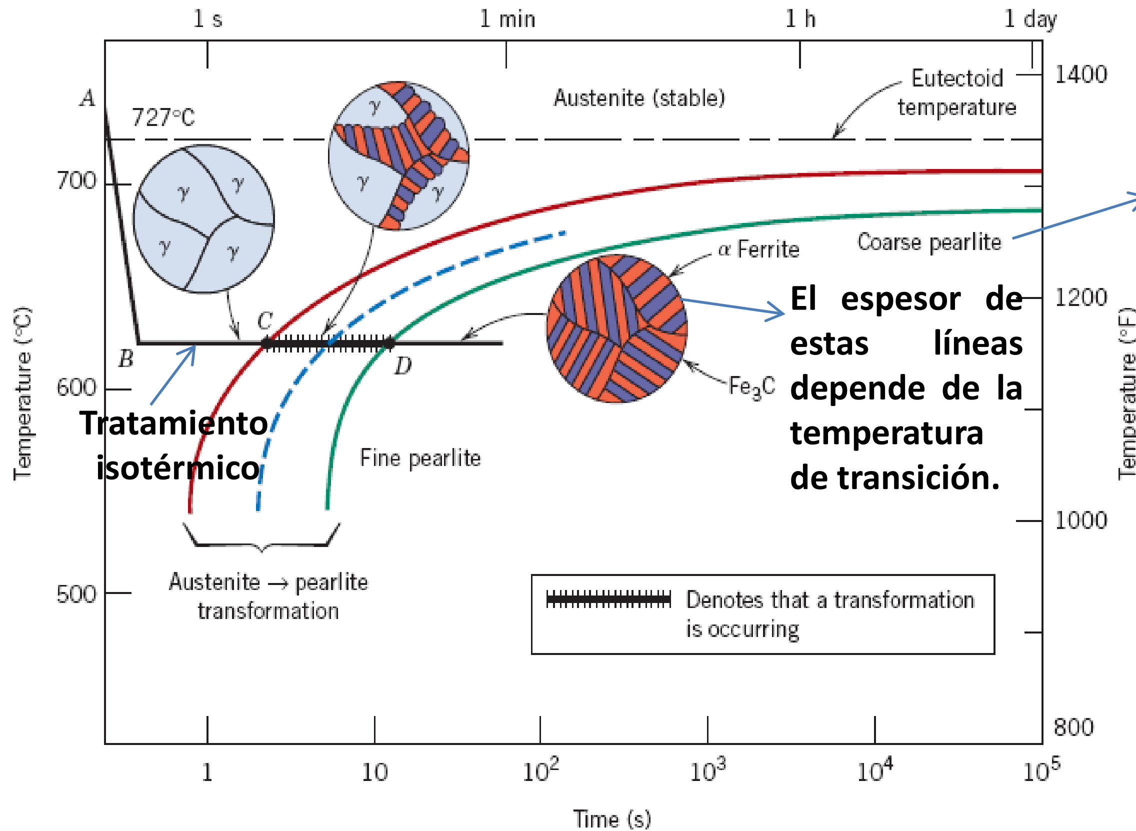
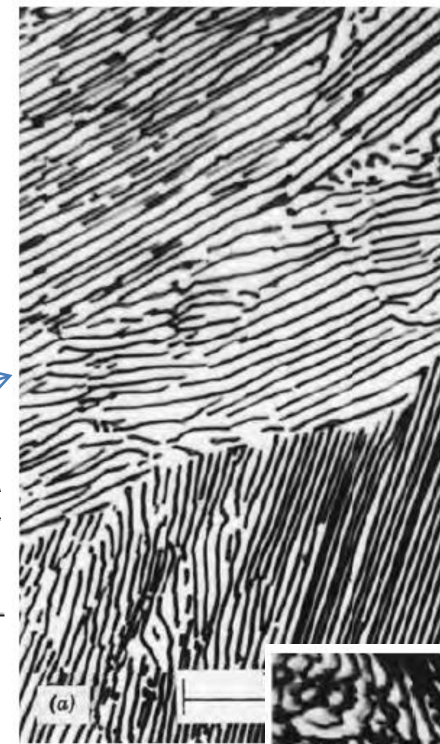


Figure 10.14 Isothermal transformation diagram for a eutectoid iron–carbon alloy, with superimposed isothermal heat treatment curve (*ABCD*). Microstructures before, during, and after the austenite-to-pearlite transformation are shown. [Adapted from H. Boyer (Editor), *Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams*, American Society for Metals, 1977, p. 28.]

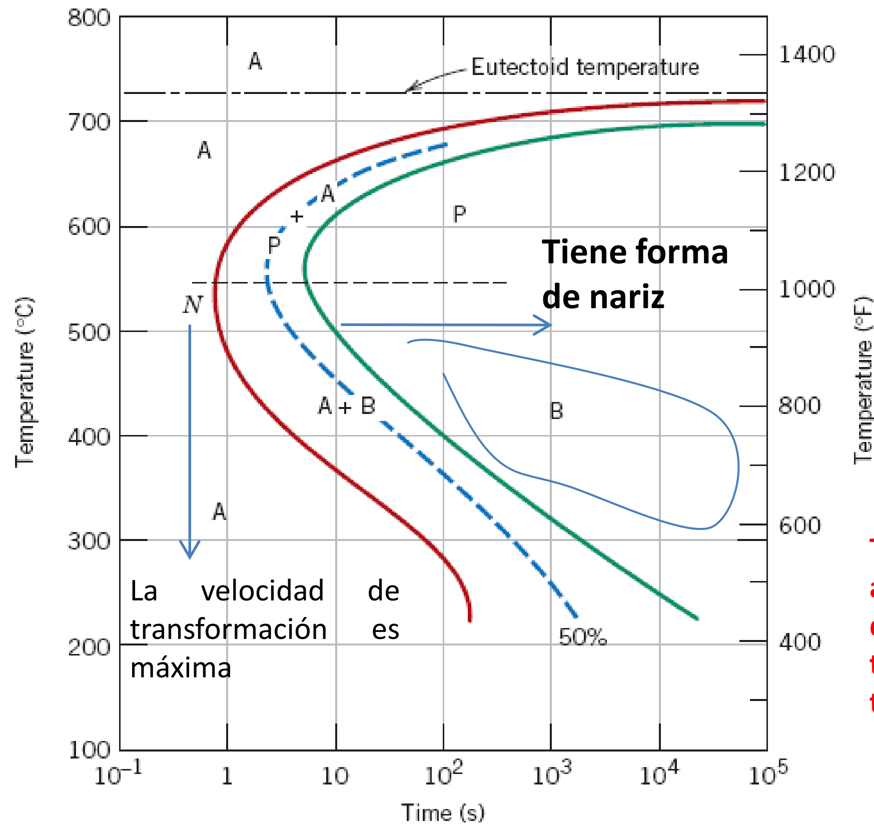


Perlita gruesa: hay altas velocidades de difusión, el carbono se puede difundir con largos recorridos.

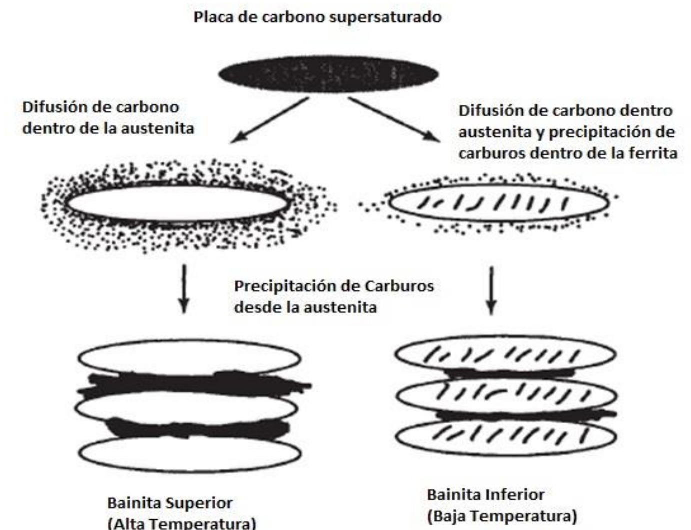


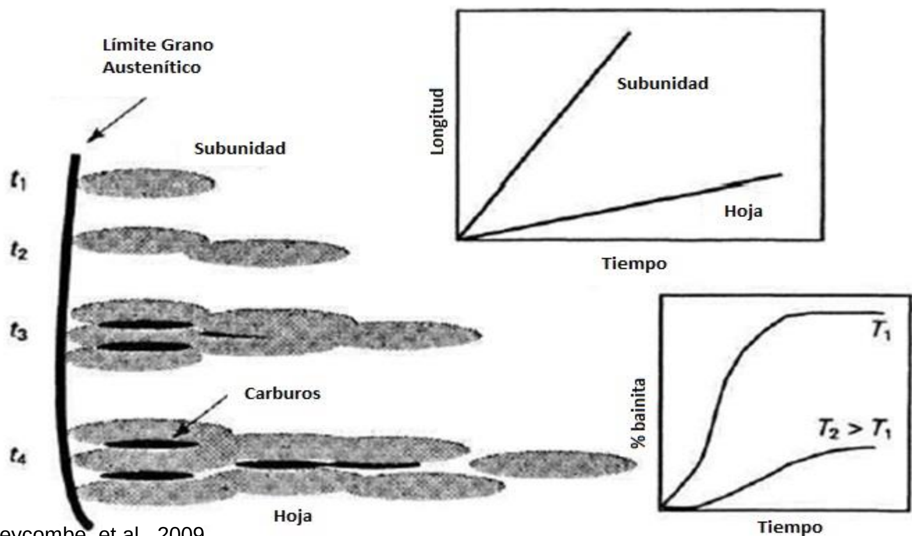
Perlita fina: Con la Disminución de la temperatura, se disminuye la velocidad de difusión

BAINITA: Ferrita y cementita



Tienen forma de agujas o placas dependiendo de la temperatura de transformación.





Honeycombe, et al., 2009

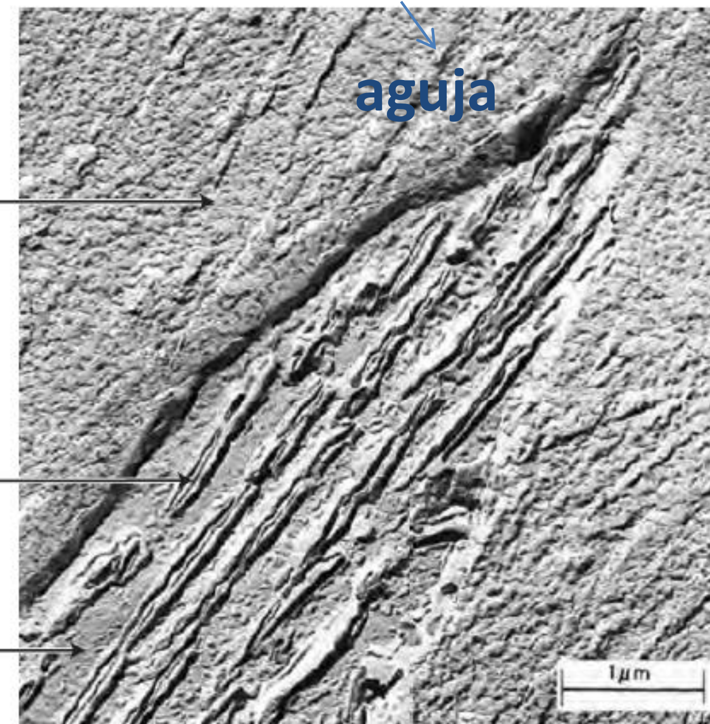
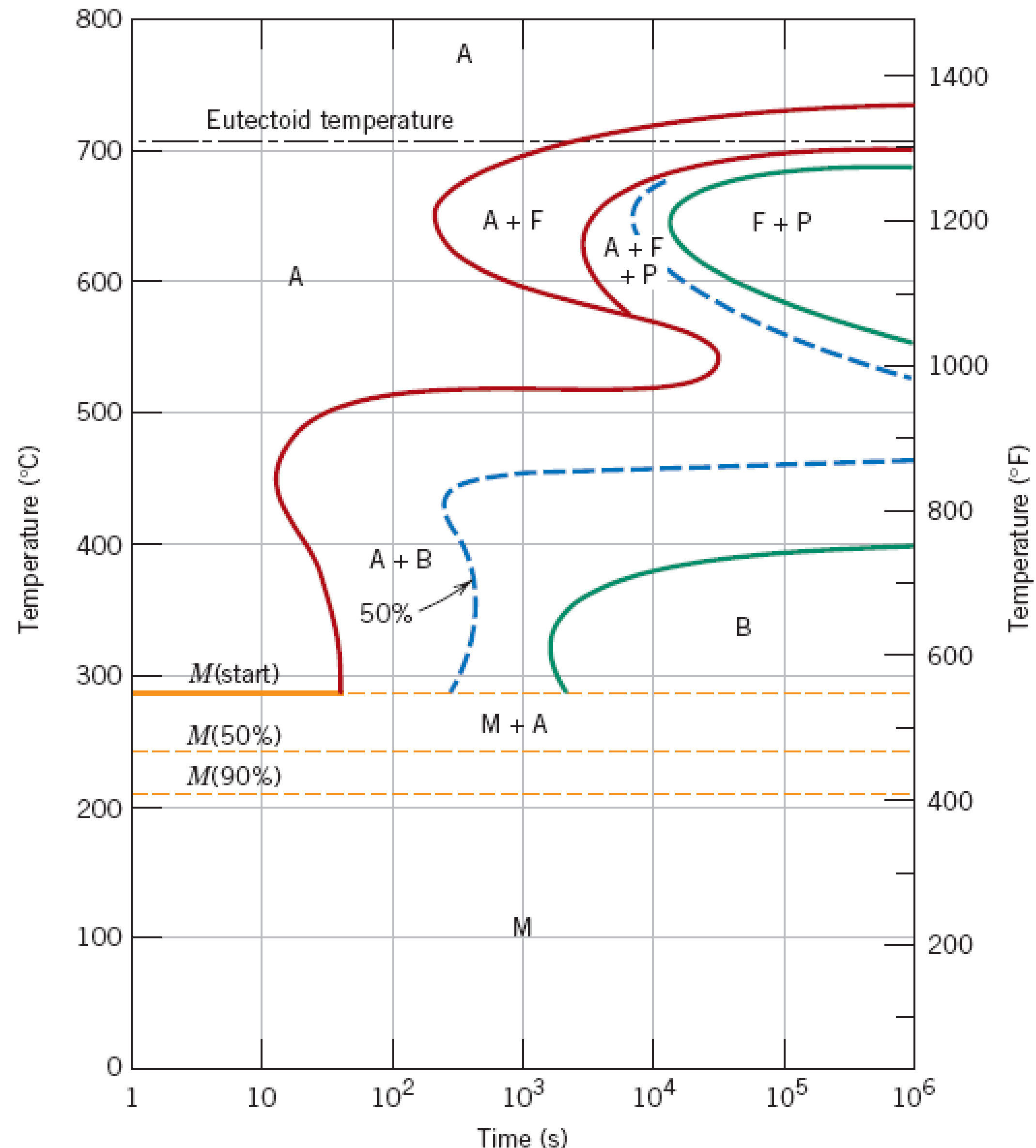


Figure 10.23 Isothermal transformation diagram for an alloy steel (type 4340): A, austenite; B, bainite; P, pearlite; M, martensite; F, proeutectoid ferrite. [Adapted from H. Boyer (Editor), *Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams*, American Society for Metals, 1977, p. 181.]



Los elementos aleantes forman una nariz para la bainita.

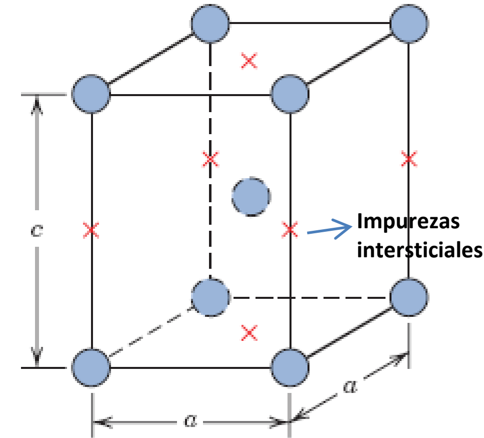
MARTENSITA

Enfriamiento rápido a temperatura ambiente – Temple – No hay difusión del carbono

800
700
600
500
400
300
200
100
0
Temperature (°C)
A
Eutectoid temperature
1400
1200
1000
800
600
400
200
Temperature (°F)
A
A
+
P
P
B
A
+
B
A
M(start)
M + A
50%
M(50%)
M(90%)
10^{-1} 1 10 10^2 10^3 10^4 10^5
Time (s)

Es una transformación atérmica, que no depende del tiempo

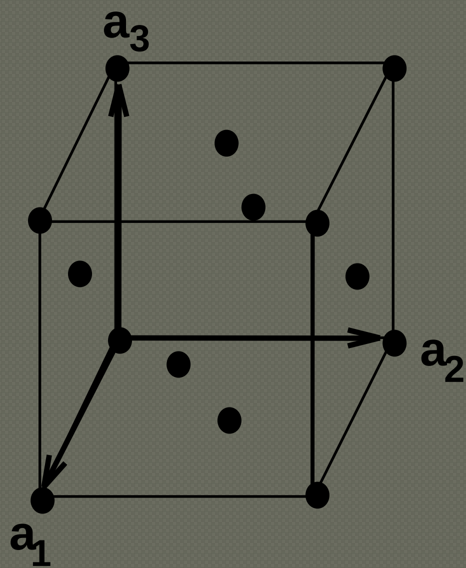
Estructura de no equilibrio que resulta de transformación sin difusión de la austenita. Se forma una estructura tetragonal centrada en el cuerpo.



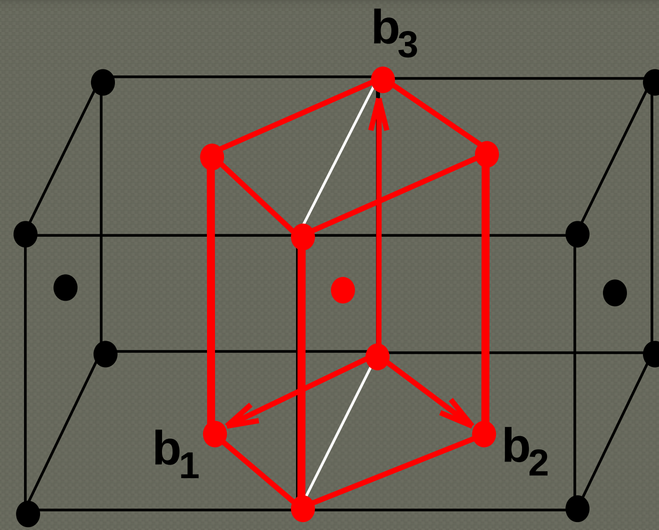
Austenita retenida



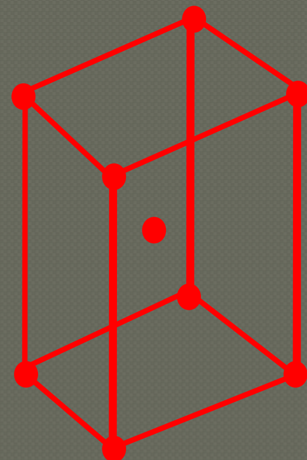
Pueden tener una forma acicular o lenticular.



(a)



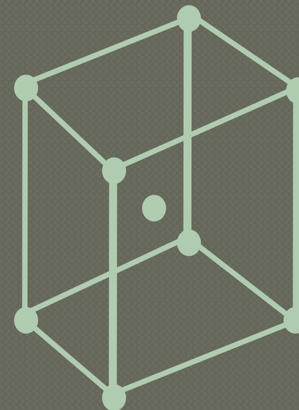
(b)



(c)
Body-centered tetragonal austenite

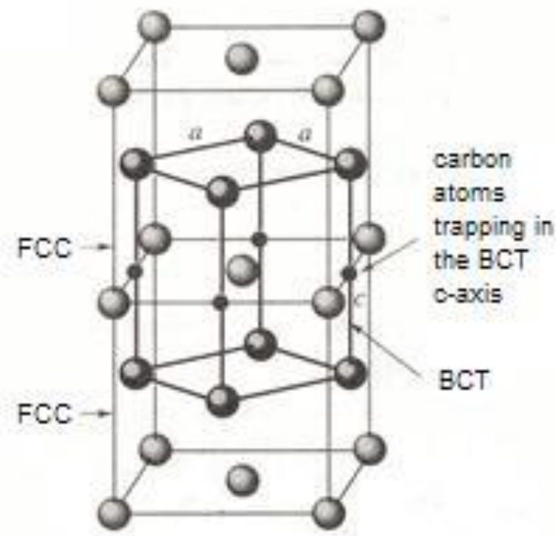
BAIN STRAIN

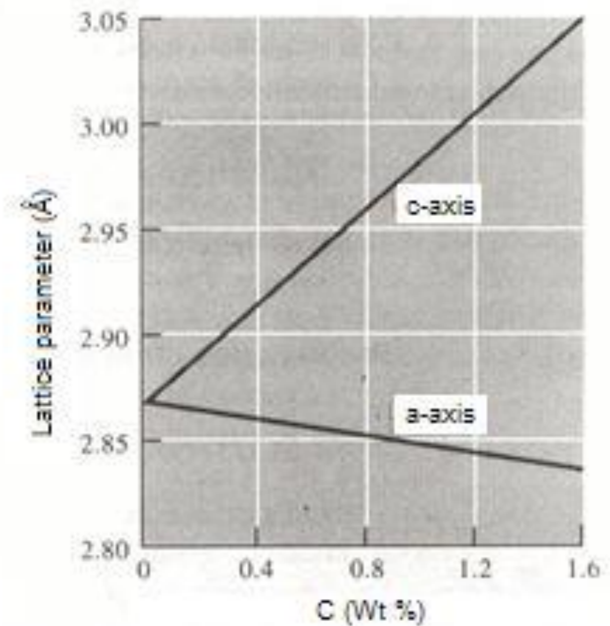


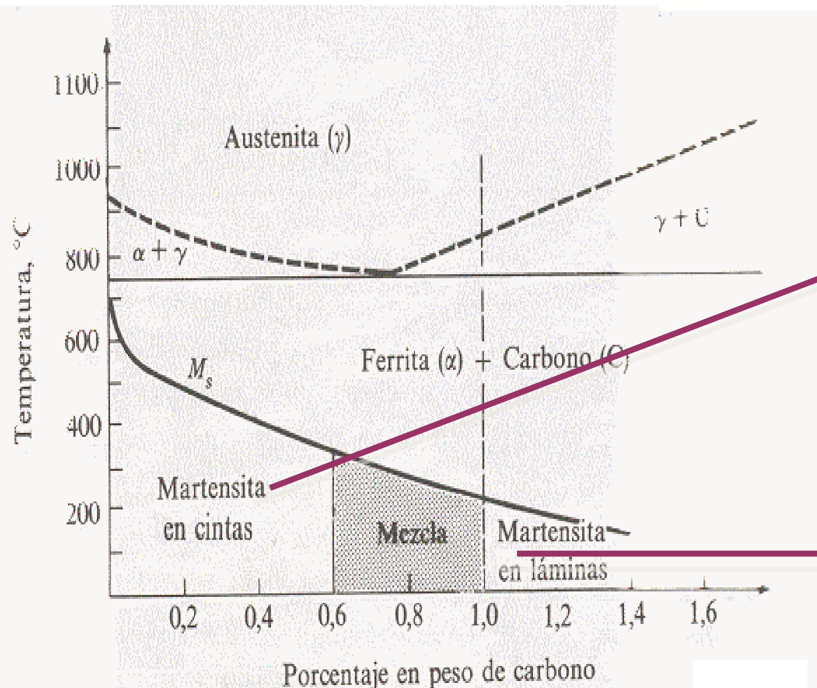


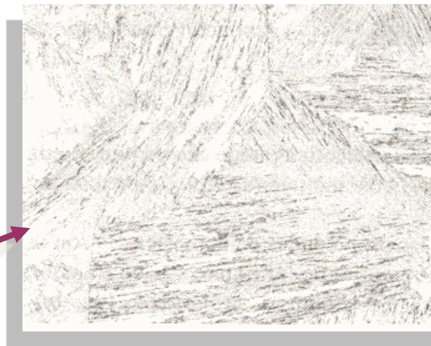
(d)
Body-centered cubic martensite

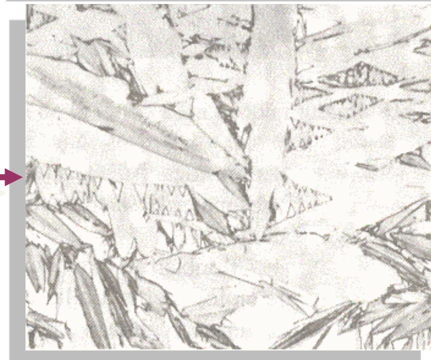
MARTENSITA



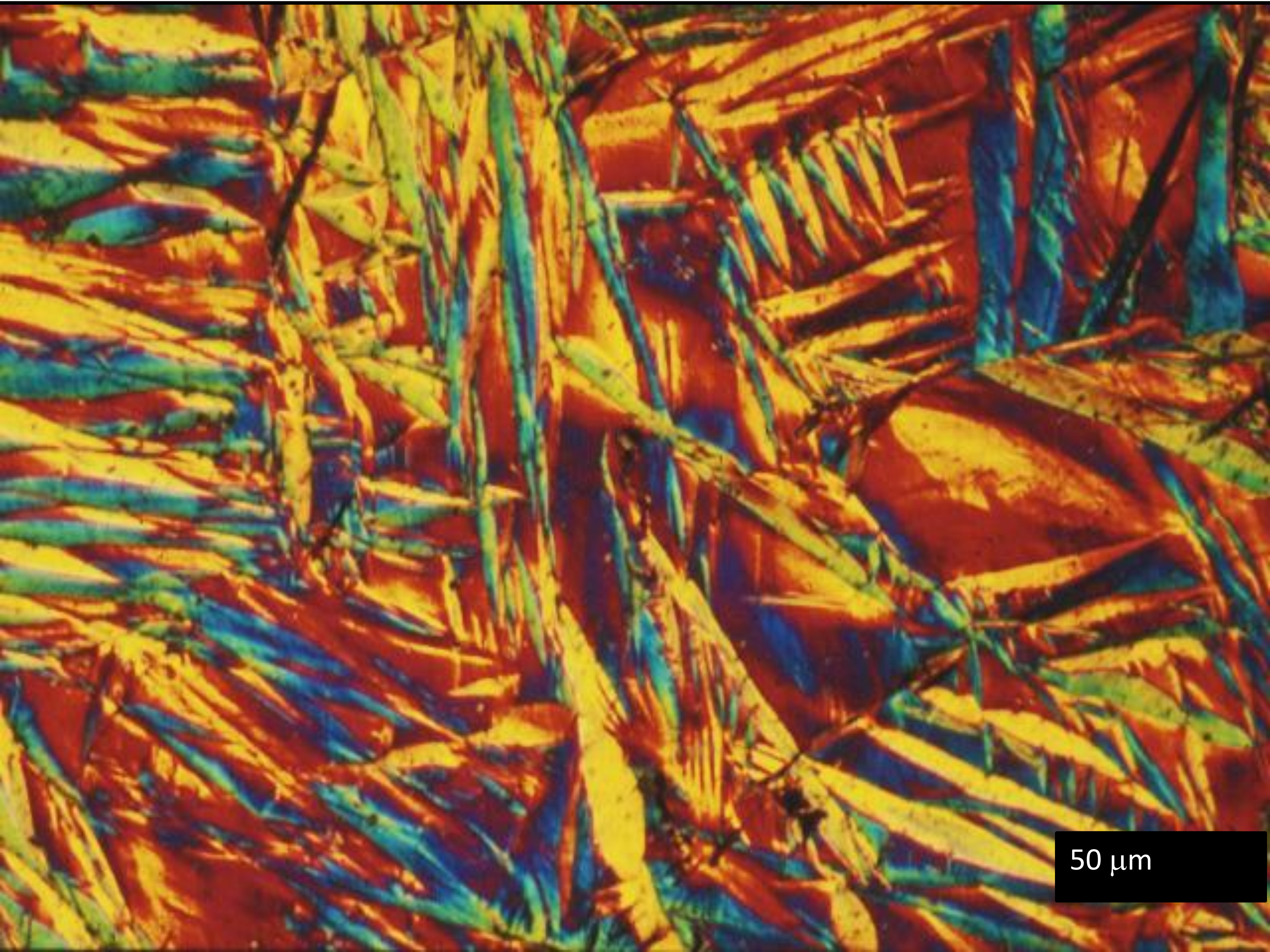








- **C<0.6%→cintas de diferentes pero limitadas orientaciones. Estructura muy distorsionada y con muchas dislocaciones**
- **1.0%<C→láminas de distintos tamaños y con estructura fina de placas paralelas. Normalmente rodeadas de austenita**
- **0.6%<C<1.0%→mezcla de cintas y láminas**


50 μm

- Quenching occurs in three stages
  - Fase de Vapor
    - Formación de una capa de vapor alrededor de la pieza
    - La transferencia de calor es lenta.
    - La transferencia de calor ocurre principalmente por radiación y conducción a traves del vapor.
  - Fase de nucleación de burbujas
    - Alta tasa de extracción de calor.
    - Remoción de calor por la formación contacto de burbujas del medio con la superficie.
  - Fase de Convección
    - Comienza por debajo de la temperatura de ebullición del medio.
    - Lenta transferencia de calor.
- Gobiernan las propiedades y las distorsión.

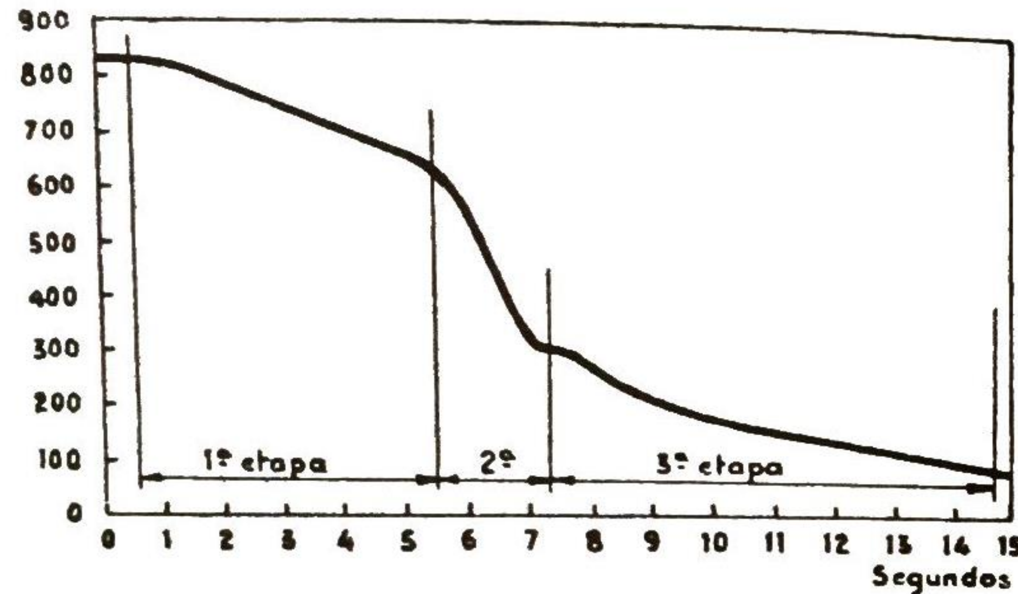
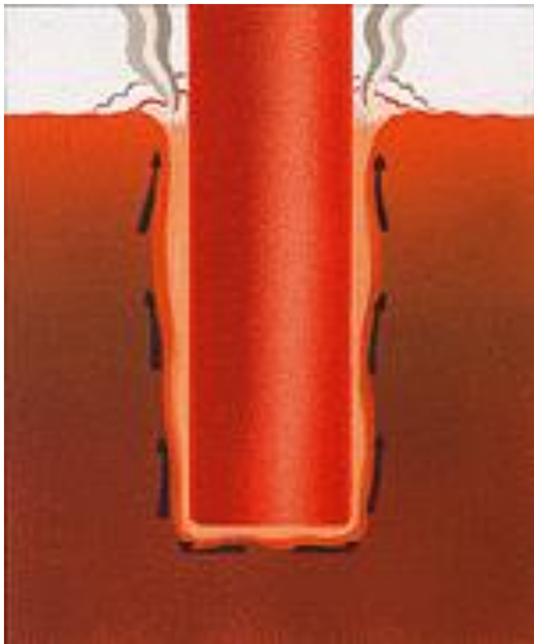
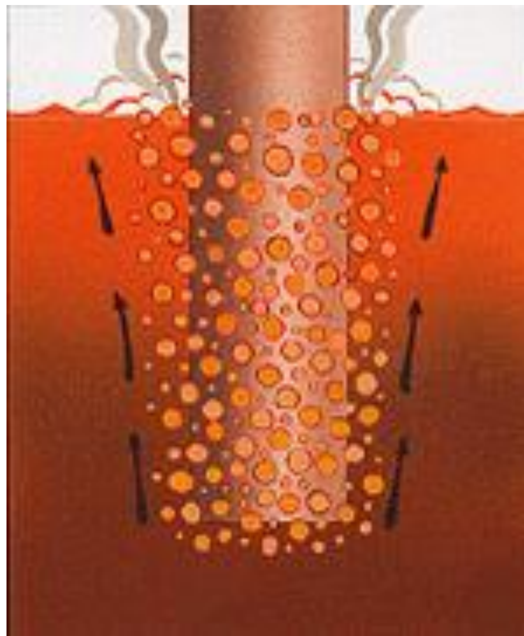


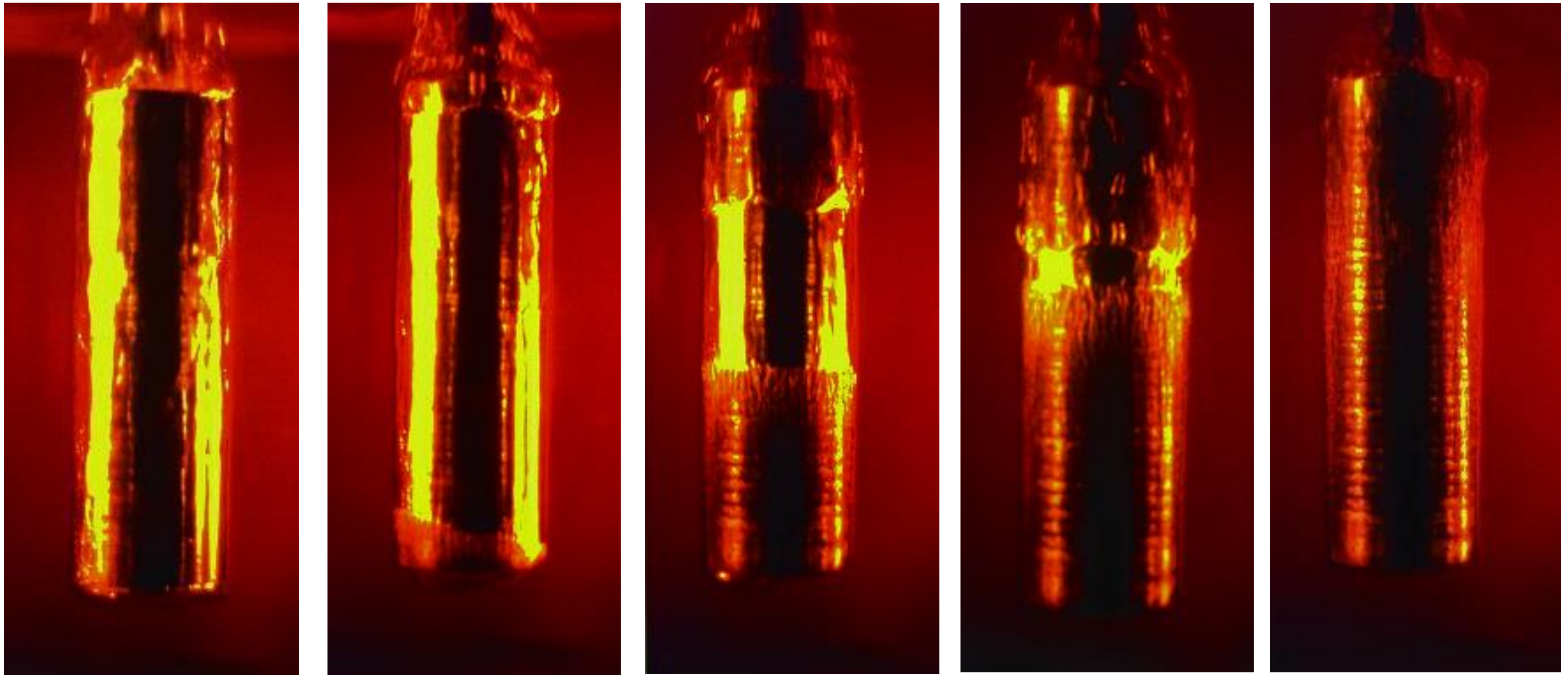
FIGURA 178

Curva de enfriamiento del centro de un cilindro de poco diámetro templado en agua caliente a 76°, determinada por Pilling y Lynch.

Al sumergirse el acero a altas temperaturas en el medio de temple ocurren las siguientes etapas.

- Formación de la capa de vapor. Conducción y radiación gaseosa
- Enfriamiento por transporte de vapor
- Conducción y convección del líquido.

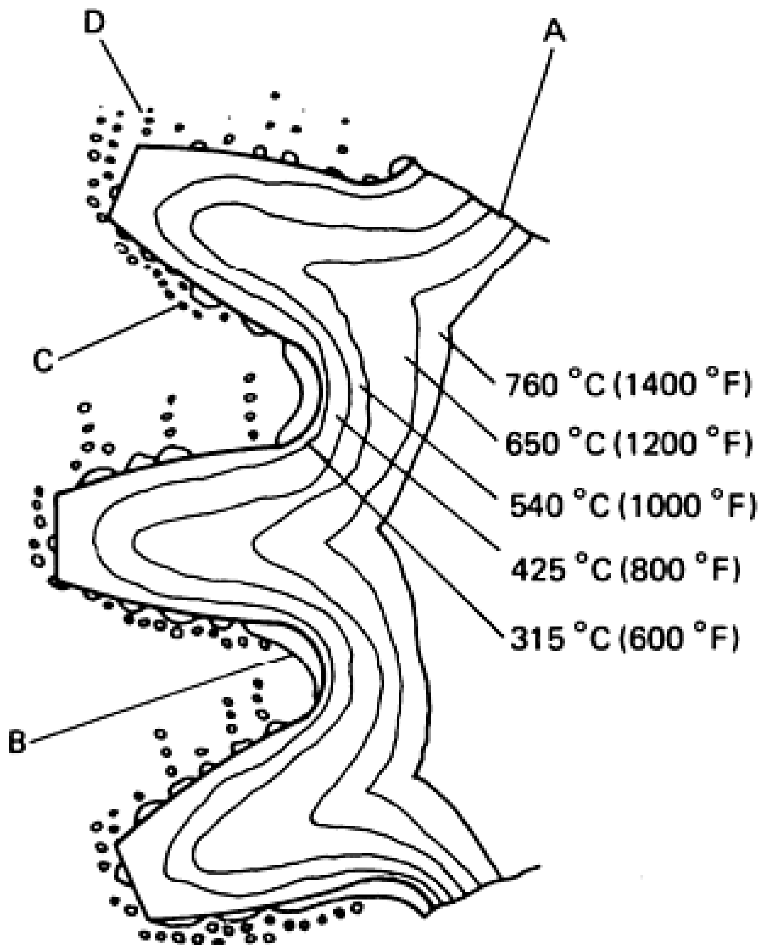



1. momento de la inmersión
2. Después de 5 s - ebullición comienza en las esquinas
3. Después de 10 s.- el frente de burbujas se mueve a lo largo de la probeta
4. Después de 15 s - se ve vapor (fases de ebullición y convección
5. Después de 30 s – fase de convección.

MARTEMPERING

TEMPE INTERRUPIDO

Se enfría rápidamente hasta una temperatura sobre Ms, se mantiene sobre un tiempo hasta que la temperatura sea homogénea o uniforme en toda la pieza, y finalmente se enfría en aire pasando por Ms hasta T ambiente.

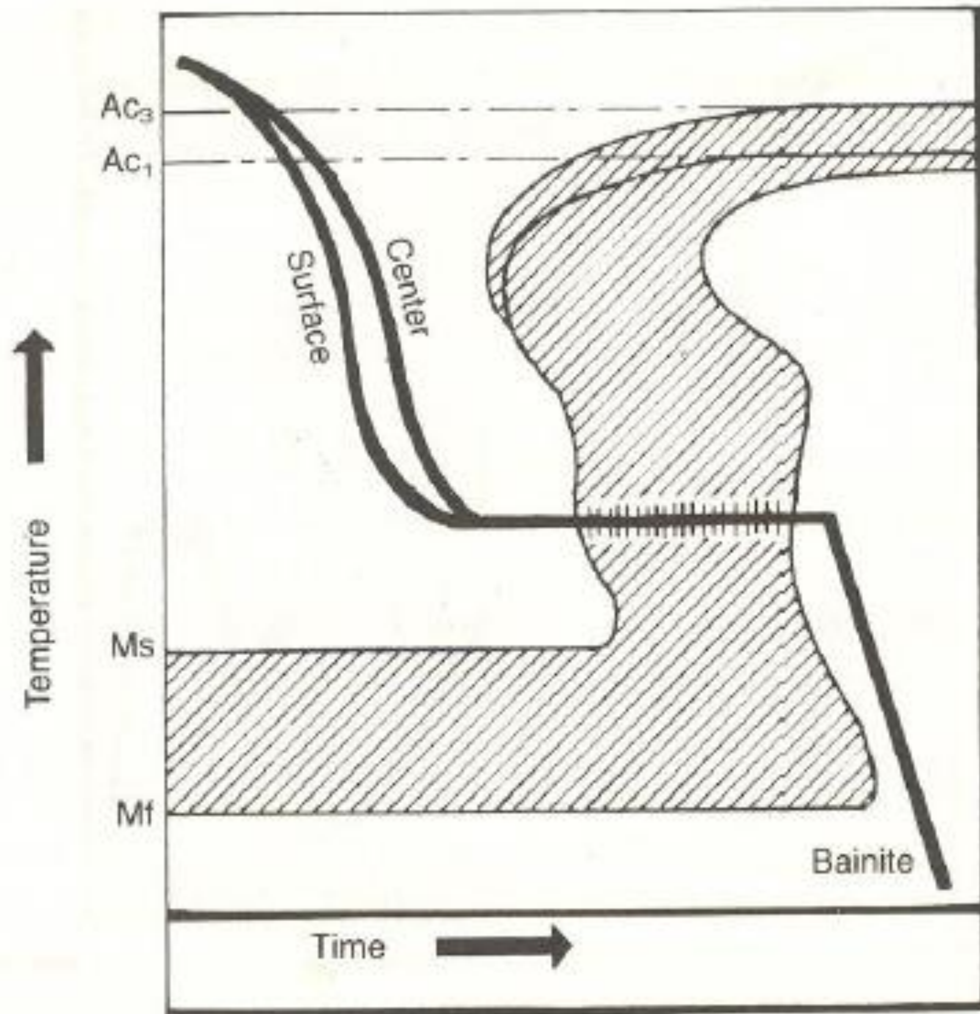


Ac_3
Ac_1
Temperature
Surface
Center
9
Ms
Mf
Tempered martensite
Time

AUSTEMPERING

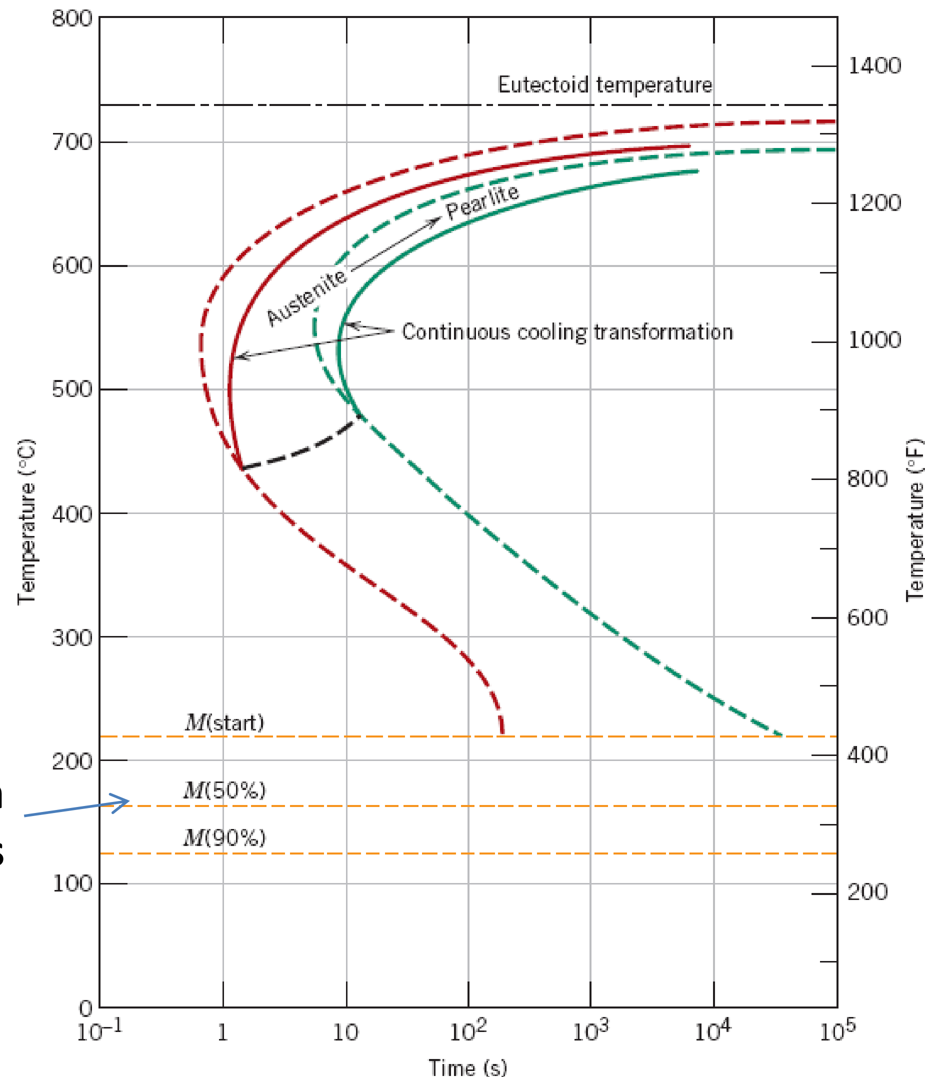
SE FORMA BAINITA EN VEZ DE MARTENSITA

No se requiere de revenido posterior.



DIAGRAMAS DE TRANSFORMACIÓN POR ENFRIAMIENTO CONTINUO - TEC

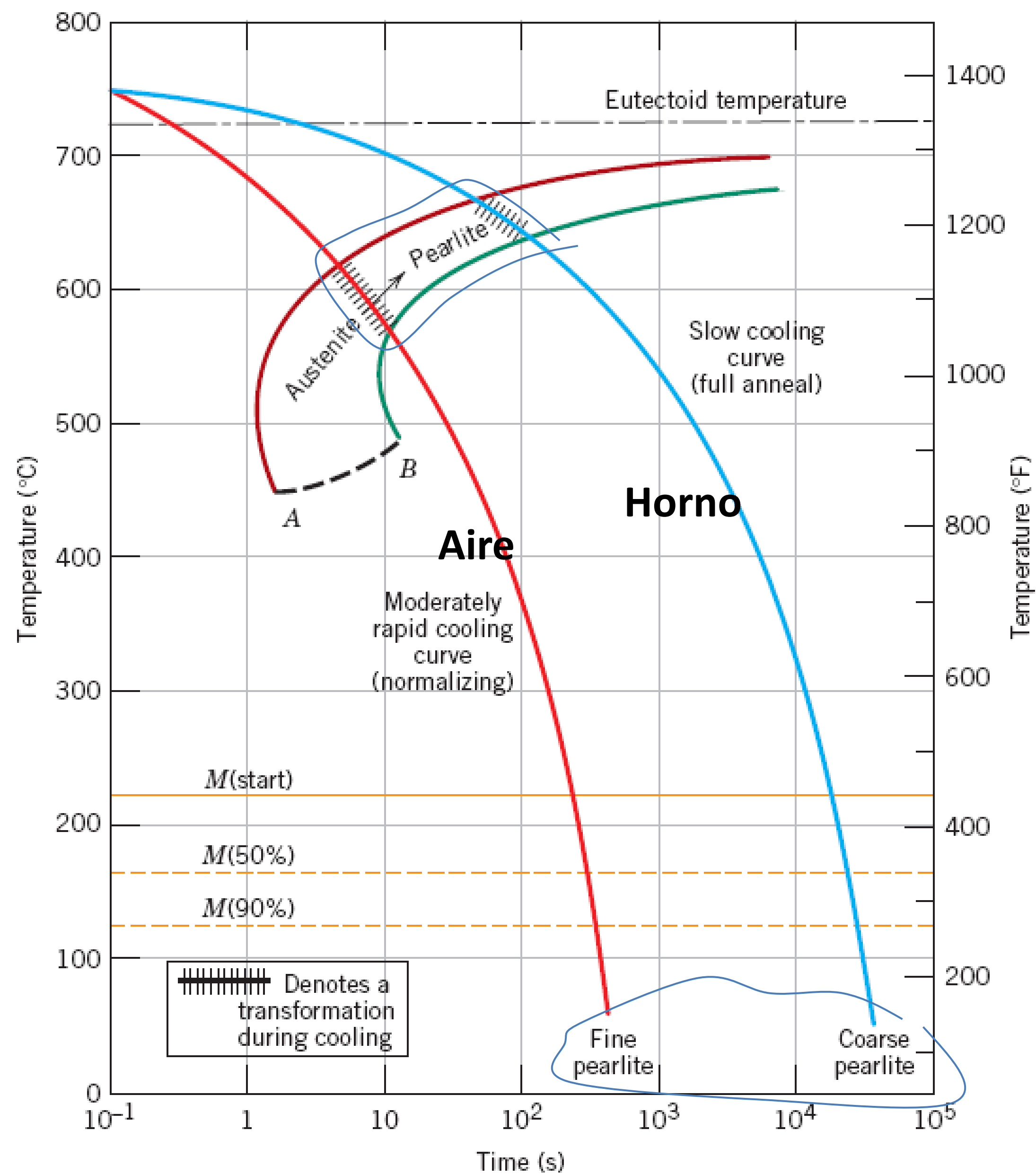
Figure 10.25 Superimposition of isothermal and continuous cooling transformation diagrams for a eutectoid iron–carbon alloy. [Adapted from H. oyer (Editor), *Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation iagrams*, American Society for Metals, 1977, p. 376.]



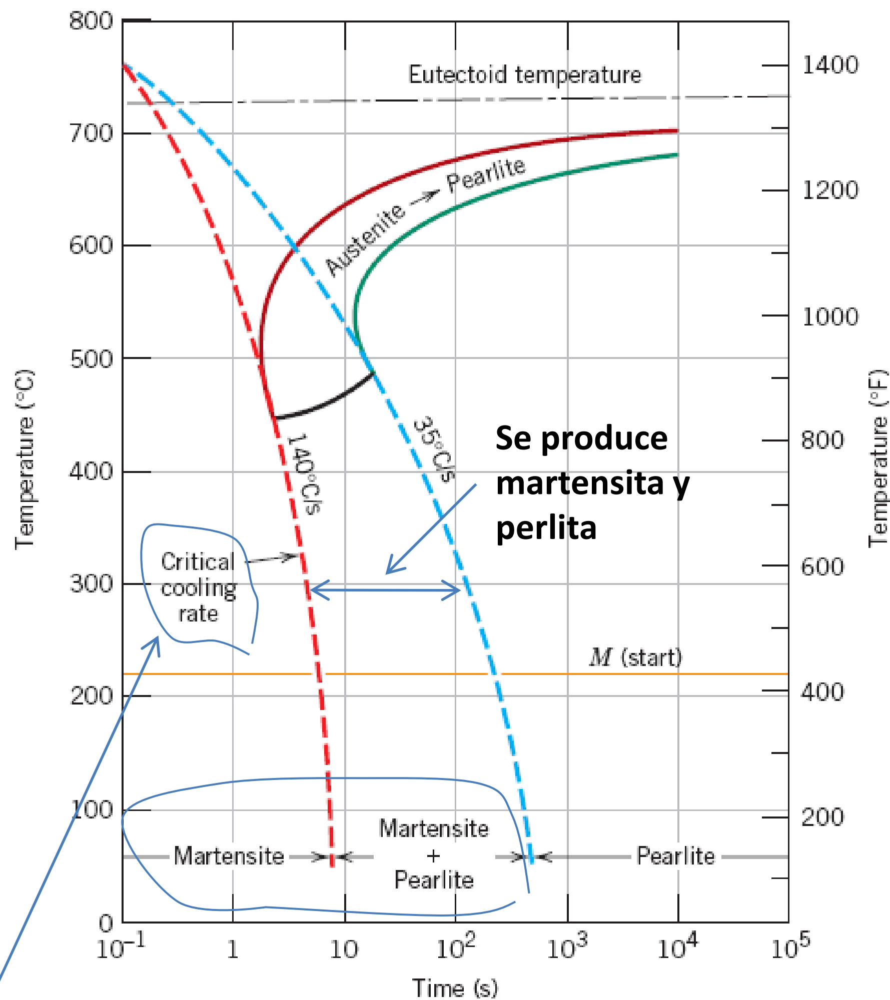
Son diagramas de fase que incluyen el tiempo

Las rectas M tienen la posición en los diagramas TTT y TEC.

Las curvas isotérmicas se desplazan hacia tiempos mayores y temperaturas mas bajas.

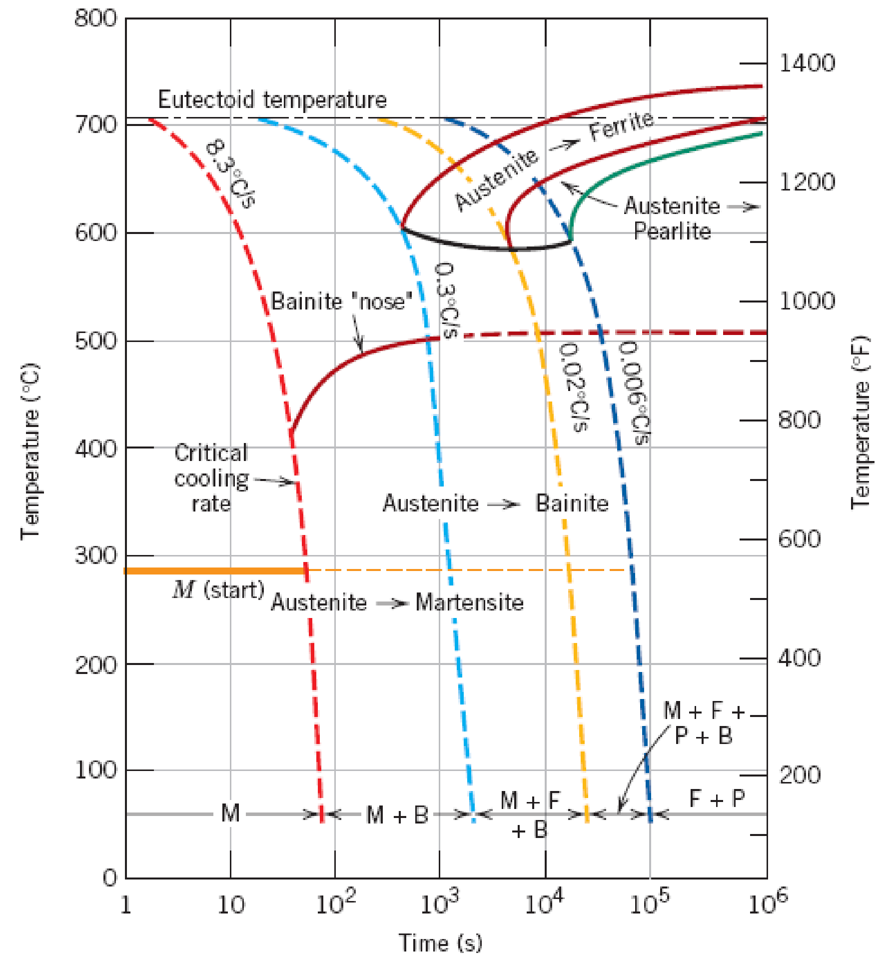


800
700
600
500
400
300
200
100
0
Temperature (°C)
1400
1200
1000
800
600
400
200
Temperature (°F)
10−1
1
10
10²
10³
10⁴
10⁵
Time (s)
Eutectoid temperature
Pearlite
Austenite
A
B
Slow cooling
curve
(full anneal)
Horno
Aire
Moderately
rapid cooling
curve
(normalizing)
M(start)
M(50%)
M(90%)
Denotes a
transformation
during cooling
Fine
pearlite
Coarse
pearlite



Velocidad de temple critica que producirá una estructura totalmente martensitica.
Apenas roza la nariz donde empieza la transformación perlítica.
La velocidad crítica de temple disminuye con la presencia de carbono. Con % menores a 0.25% no se someten a temple.

Los elementos eleantes forman una nariz de bainita, ej aceros 4340.
Los elementos aleantes facilitan la formación de la martensita, importante en secciones gruesas.



COMPORTAMIENTO MECÁNICO

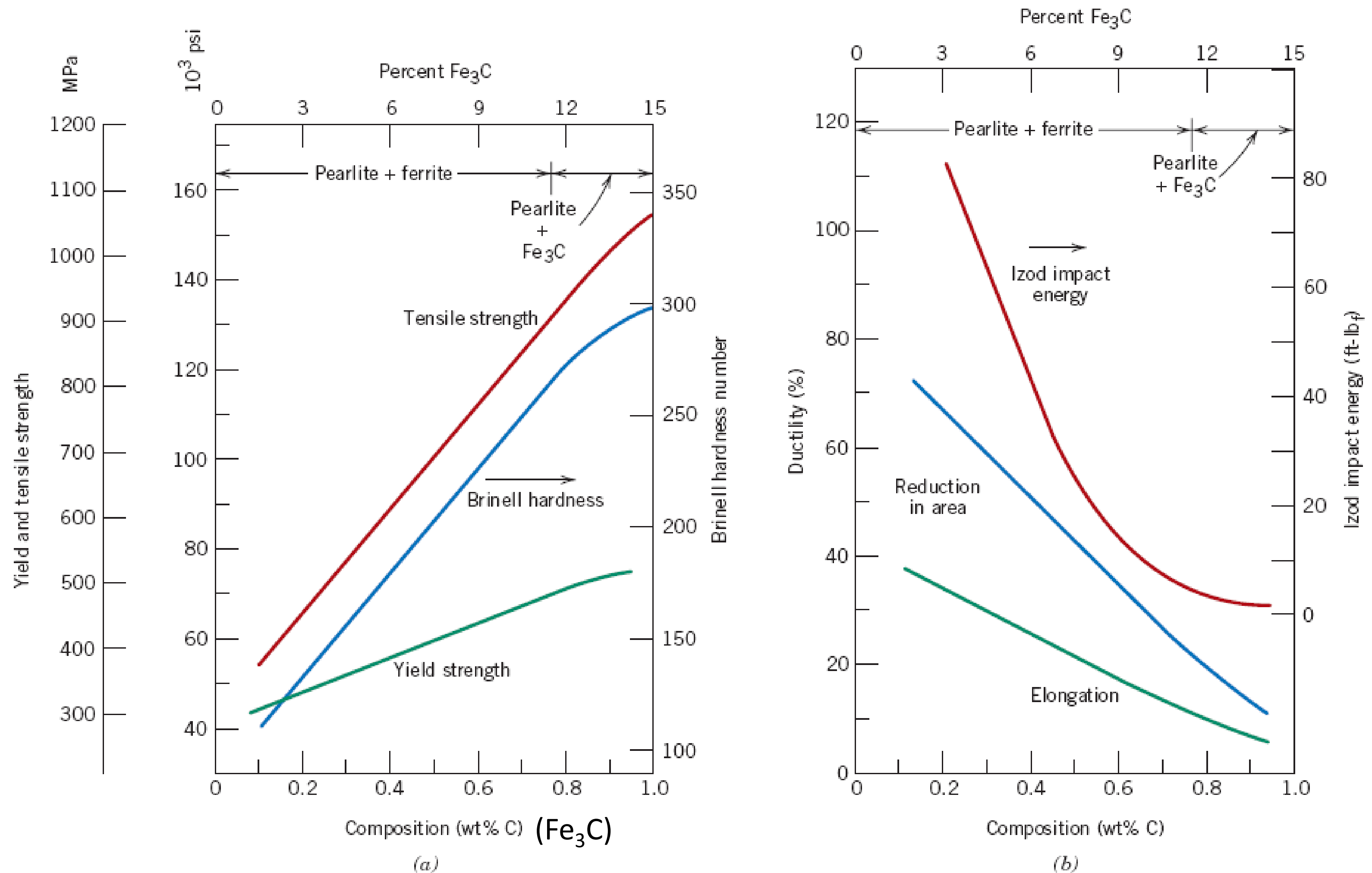
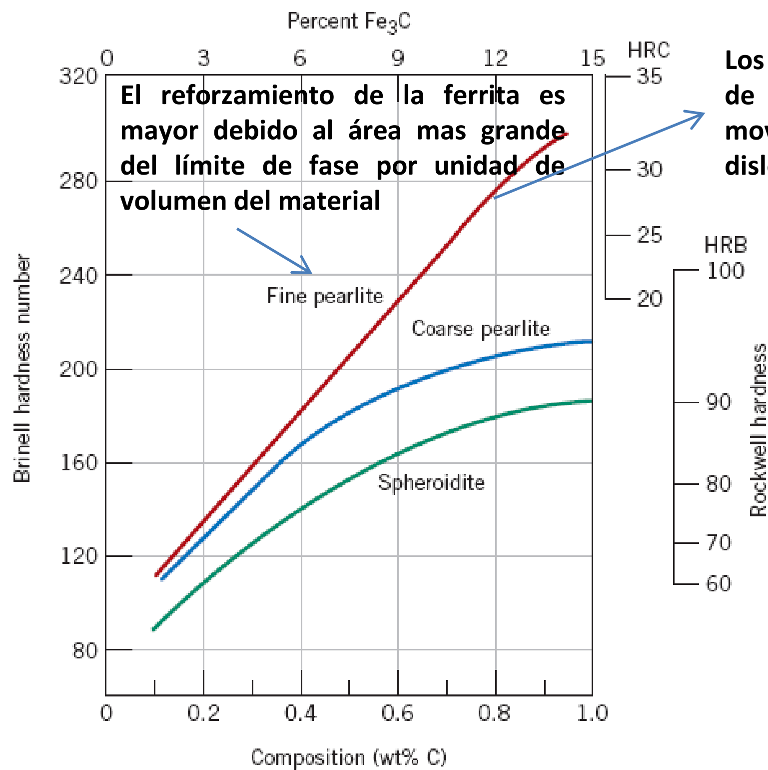


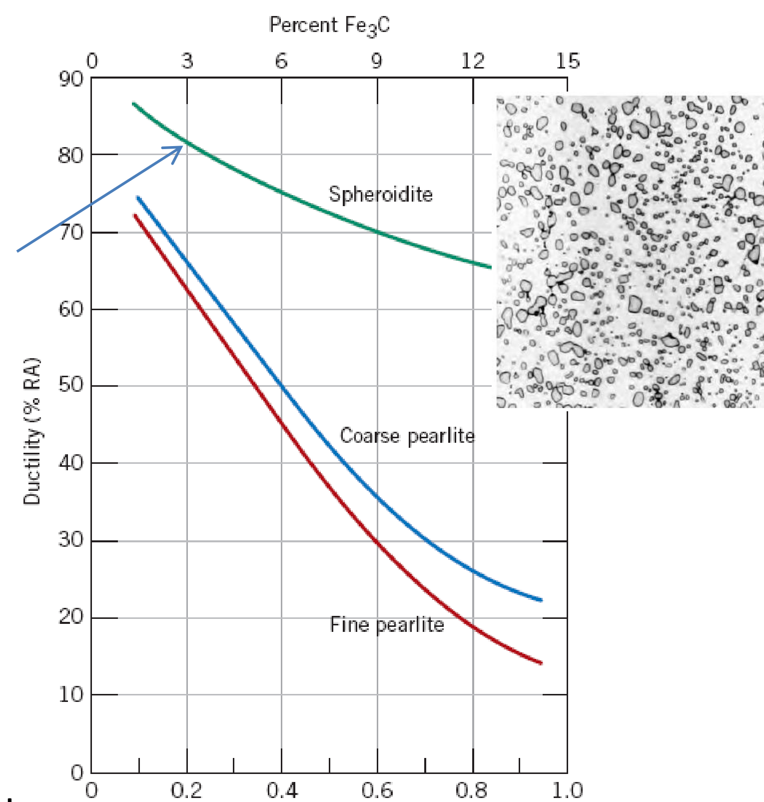
Figure 10.29 (*a*) Yield strength, tensile strength, and Brinell hardness versus carbon concentration for plain carbon steels having microstructures consisting of fine pearlite. (*b*) Ductility (%EL and %RA) and Izod impact energy versus carbon concentration for plain carbon steels having microstructures consisting of fine pearlite. [Data taken from *Metals Handbook: Heat Treating*, Vol. 4, 9th edition, V. Masseria (Managing Editor), American Society for Metals, 1981, p. 9.]

- La cementita es frágil y dura - Fenómenos que ocurren en los límites de las fases de ferrita y cementita, por ejemplo, la cementita que es rígida y resistente restringe la deformación de la ferrita, es decir, se refuerza la ferrita

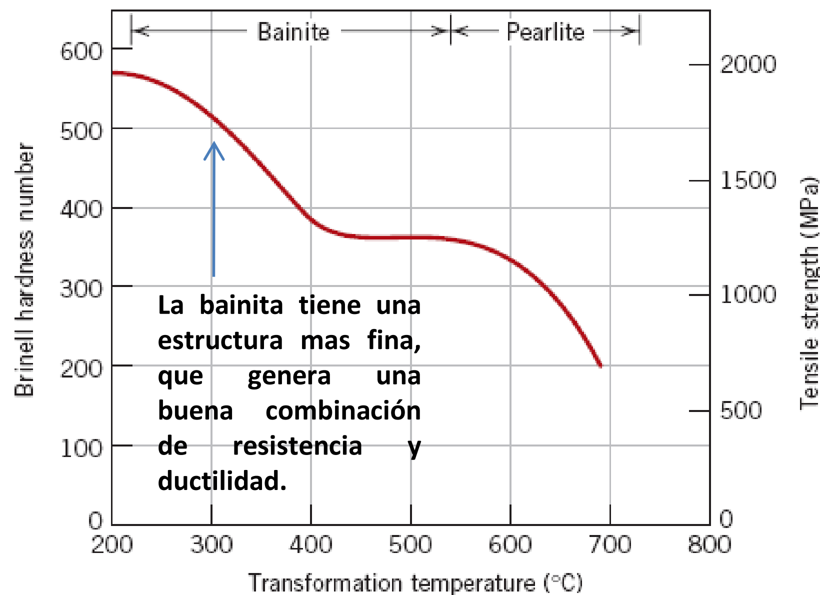


El reforzamiento de la ferrita es mayor debido al área mas grande del límite de fase por unidad de volumen del material

Los límites de fase sirven de barreras al movimientos de las dislocaciones.

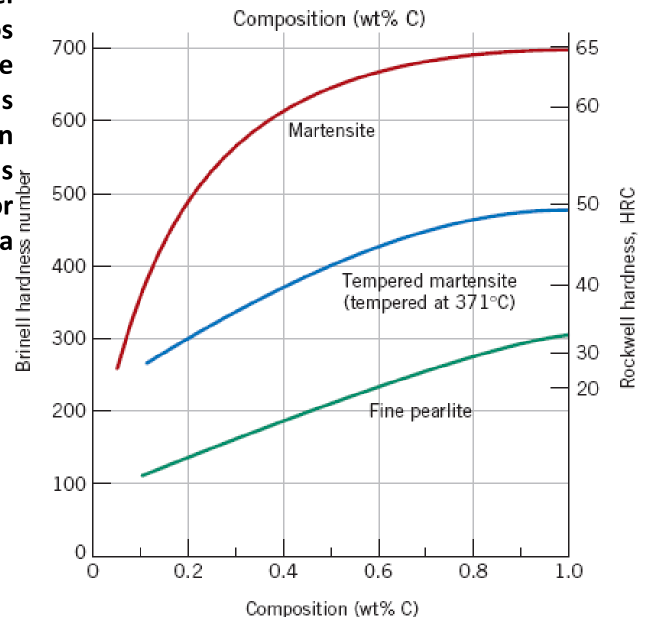


La microestructura tiene que ver con la forma y distribución de las fases: En la esferoidita, el área límite por unidad de volumen es menor.



La bainita tiene una estructura mas fina, que genera una buena combinación de resistencia y ductilidad.

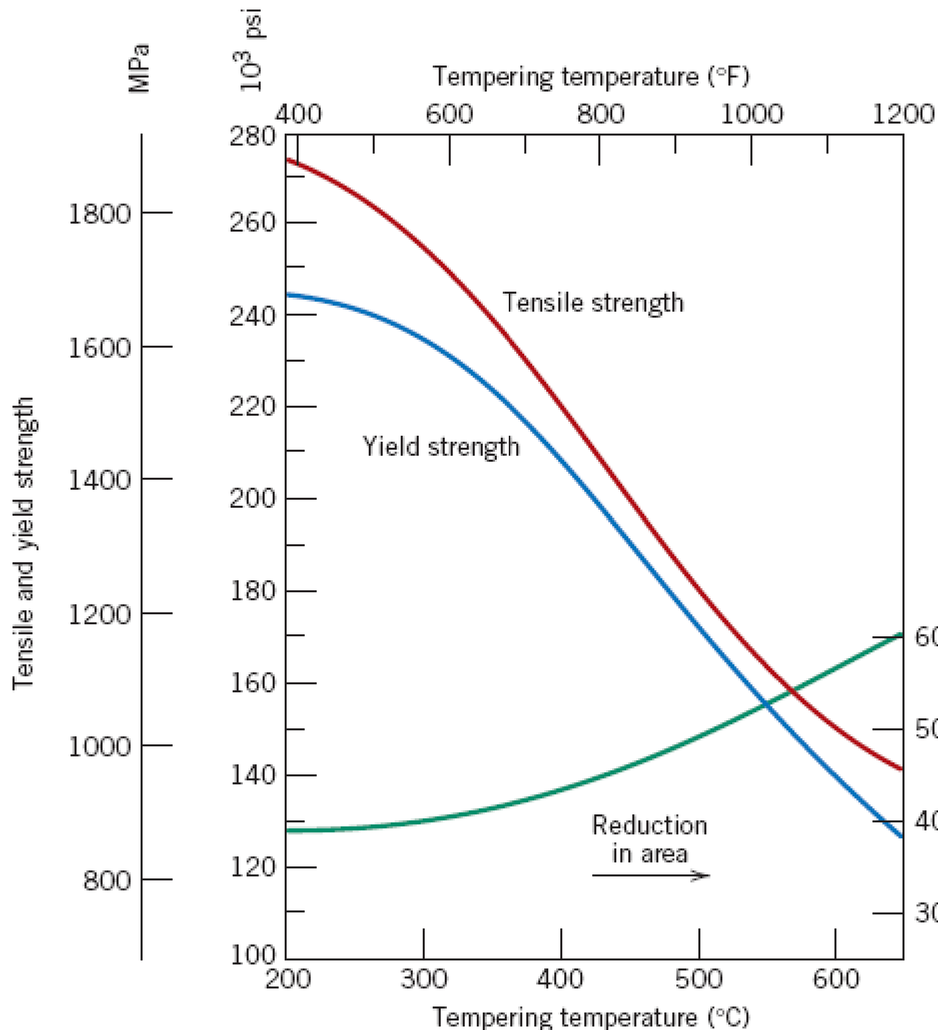
En la martensita, el carbono en los intersticios disminuye el movimiento de las dislocaciones, también se reduce los sistemas de deslizamiento por la presencia de una estructura BCT.

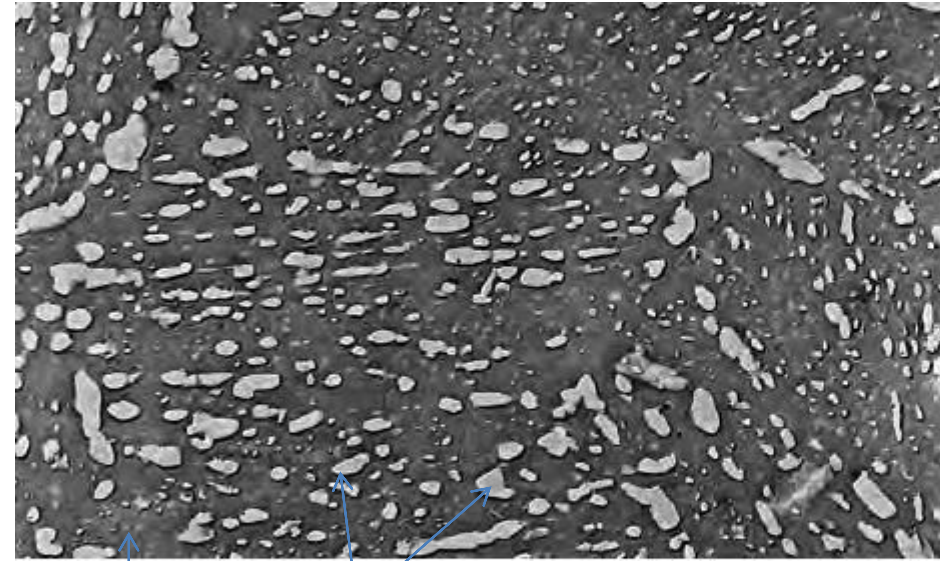


MARTENSITA REVENIDA

martensite (BCT, single phase) $\rightarrow$ tempered martensite (α + Fe_3C phases)

El revenido se logra al calentar un acero martensitico a una temperatura inferior a la eutectoide. Este tratamiento determina el tamaño de la cementita.





Matriz de ferrita

Partículas de cementita muy finas

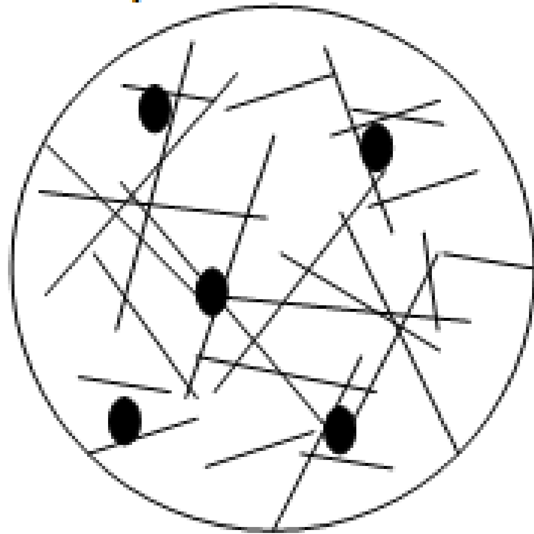
Se aumenta la tenacidad y la ductilidad

La dureza dependerá del área límite entre de las fases ferrita-cementita por unidad de volumen .

La fase cementita refuerza la ferrita a lo largo de los límites y estos límites actúan como barreras al movimiento de las dislocaciones.

Enfriamiento en Aire.

Tempered Microstructure



Hardness, HRC

Elongation, A10%

60

55

50

15

10

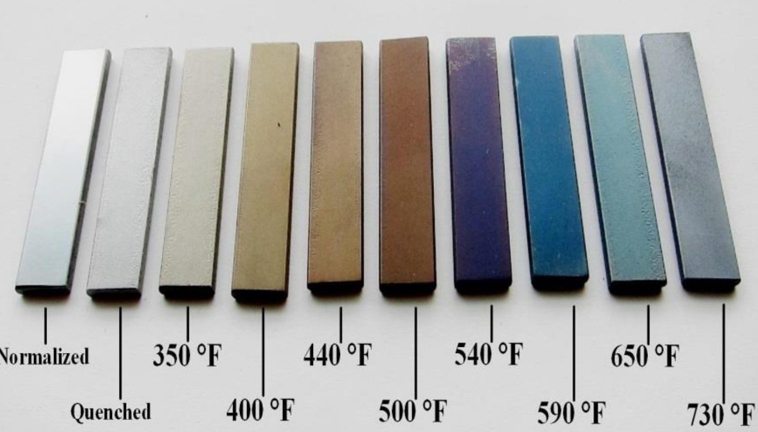
5

Hardness

Elongation (toughness)

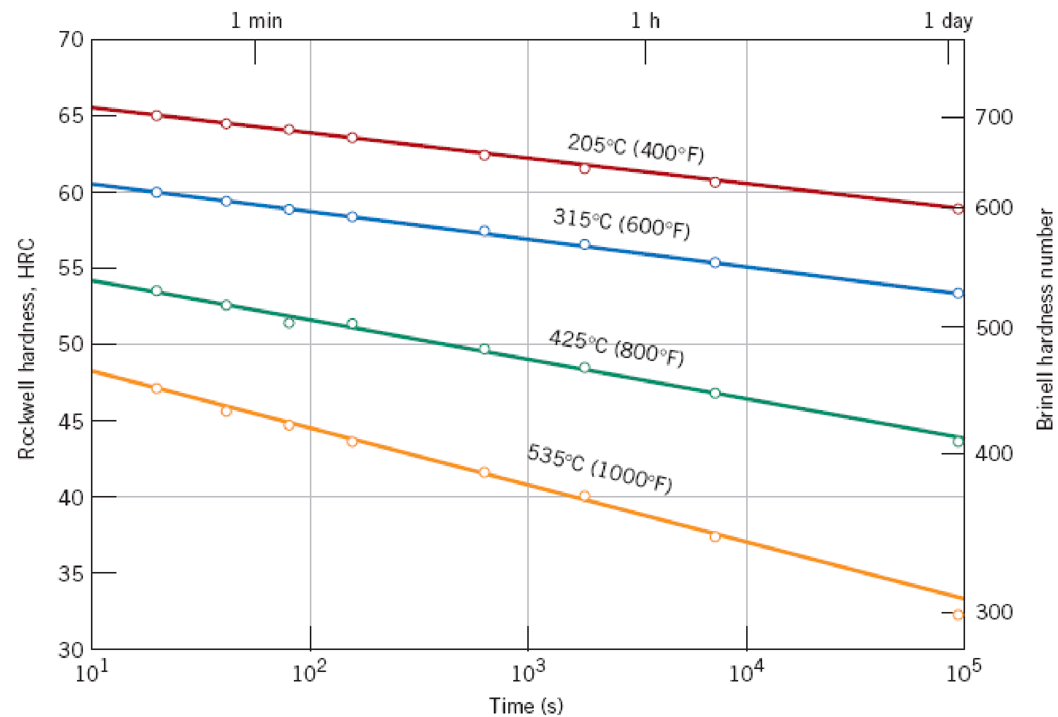
100 200 300 400 500 600

Tempering temperature, °C



Tempering colors of steel

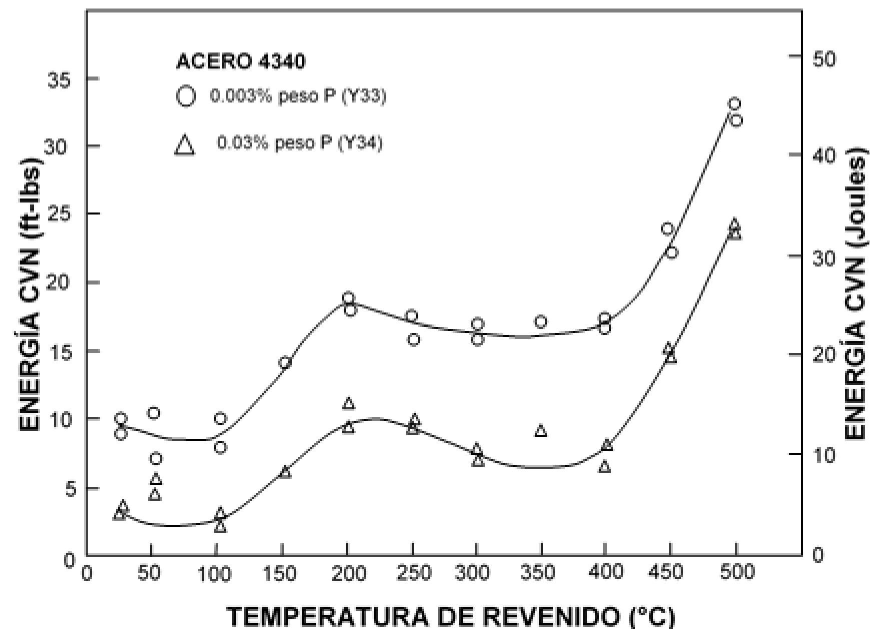
Figure 10.35 Hardness (at room temperature) versus tempering time for a water-quenched eutectoid plain carbon (1080) steel. (Adapted from Edgar C. Bain, *Functions of the Alloying Elements in Steel*, American Society for Metals, 1939, p. 233.)



Frágilización de revenido. Se han encontrado ha ciertas temperaturas de revenido (por ejemplo de 375-575°C) un material frágil a temperatura ambiente que puede generar una fractura intergranular. Generalmente se presenta en aceros aleados con Mn, Ni o Cr y con trazas de estaño, antimonio, fosforo, y arsenico. También se ha encontrado que los elementos de aleación y las impurezas tienen segregación preferencia en zonas como los límites de grano.

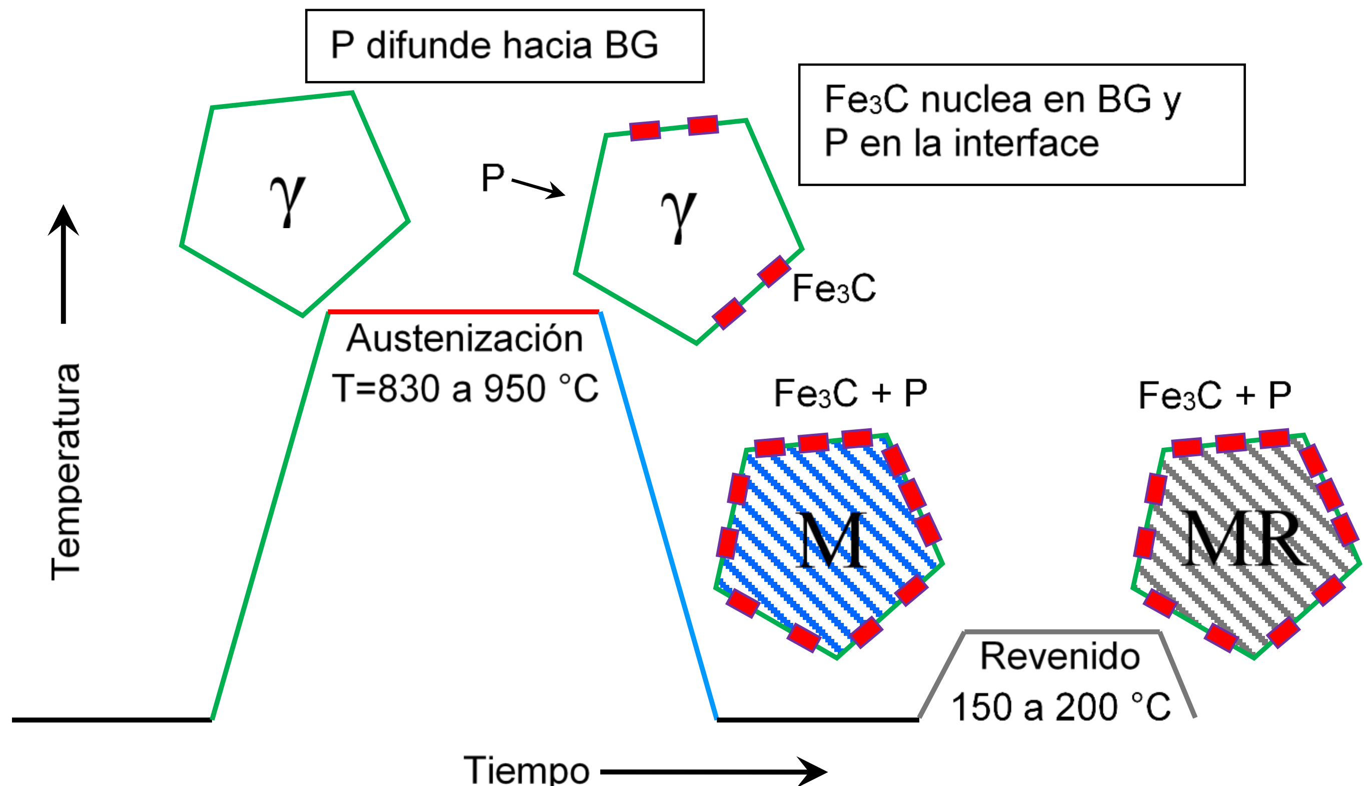
Fragilización por Revenido Reversible (RTE). Se han calentado o se han enfriado lentamente a través de un rango de temperaturas entre 300 y 600 °C. Este fenómeno es reversible, ya que un recalentamiento del acero fragilizado por encima de 600°C y un enfriamiento rápido remueve la mayor parte de la fragilización. La RTE se caracteriza por una pérdida de ductilidad, un incremento en la temperatura de transición dúctil a frágil y un aumento en el porcentaje de fractura intergranular. La RTE se produce por la segregación de trazas de impurezas (**principalmente P, Sn, Sb, As**) hacia los bordes de grano y a las interfaces de los carburos.

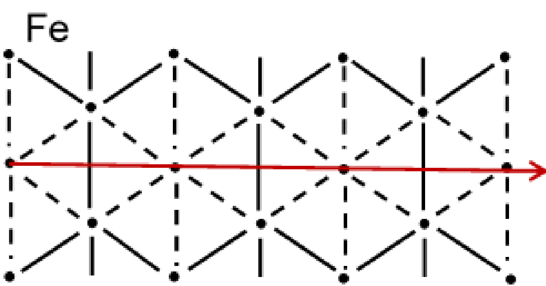
Fragilización por Martensita (TME). Conocida también como fragilización en 350 °C. Esta pérdida ocurre cuando un acero martensítico de baja aleación se reviene por tiempos cortos (normalmente una hora) a temperaturas en el rango de 250-400 °C. la fragilización coincide con el inicio de la precipitación de cementita, y segundo, para que ocurra la fragilización es esencial la segregación de impurezas hacia los bordes de grano.



Fragilización por Temple (QE). Está asociada con la segregación de fósforo hacia los bordes de grano de la austenita y la formación de cementita en estos mismos durante las etapas del tratamiento térmico de austenización y/o temple.

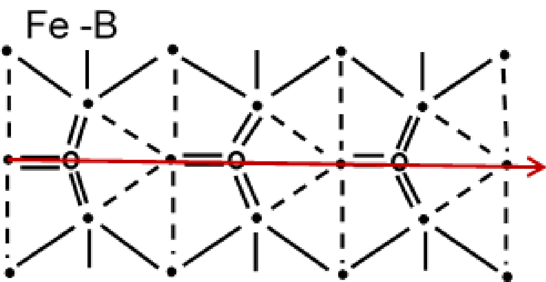
Durante el proceso de austenización, el fósforo se segrega hacia los bordes de grano de la austenita. El fósforo en estos límites fomenta la formación de cementita en los límites de grano de la austenización y con el crecimiento de la cementita se produce la difusión de fósforo y carbono a los límites de grano. También puede ocurrir una precipitación adicional de cementita durante el temple, resultando en una estructura martensítica final con los bordes de grano fragilizados.





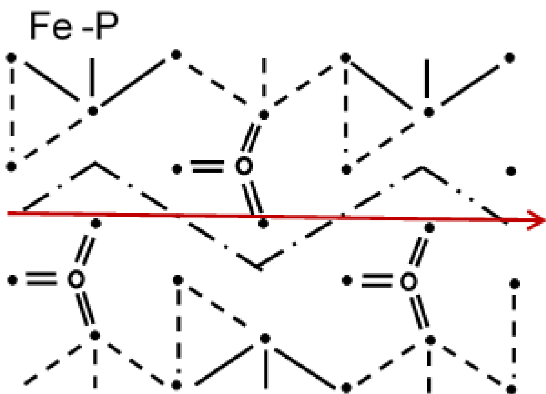
Borde de grano

(a)



Borde de grano

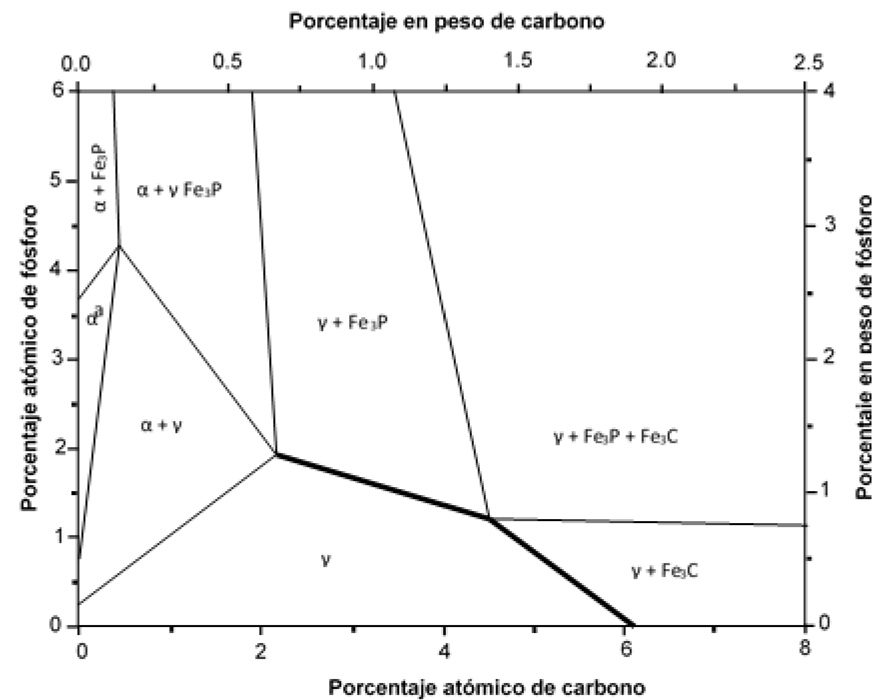
(b)



Borde de grano

(c)

Las flechas rojas representan el plano del borde de grano. Las líneas dobles, simples y discontinuas representan enlaces fuertes, normales y débiles entre átomos, respectivamente. (a) Borde de grano en el hierro puro, (b) borde de grano en la aleación Fe-B, y (c) borde de grano en la aleación Fe-P [71].



El efecto de la segregación de fósforo se aumenta por su interacción con el carbono en los bordes de grano. Con un incremento en el contenido del fósforo se disminuye la solubilidad del carbono en la austenita. Con el incremento de la concentración volumétrica de fósforo y la segregación de fósforo hacia los límites de grano de la austenita se aumenta la formación de cementita y se disminuye la solubilidad del carbono en equilibrio con la cementita.

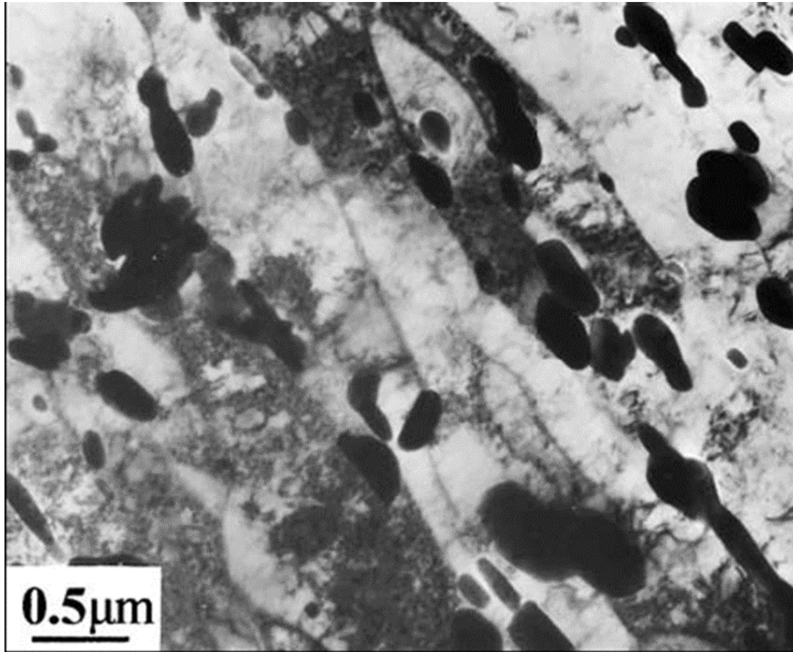
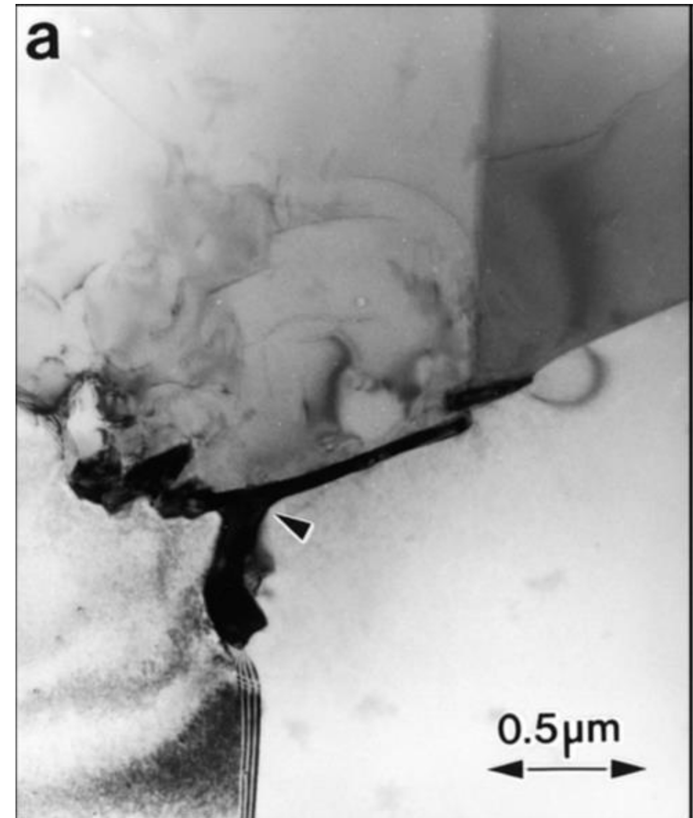
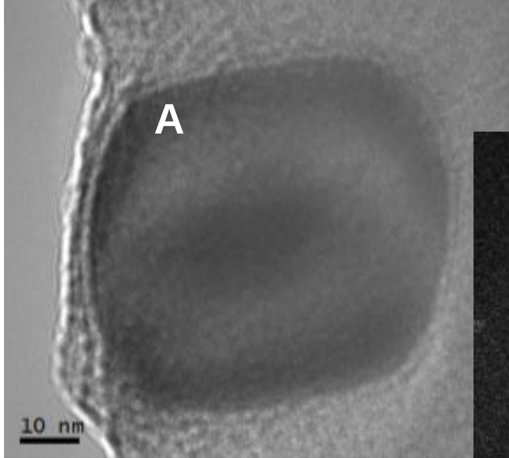
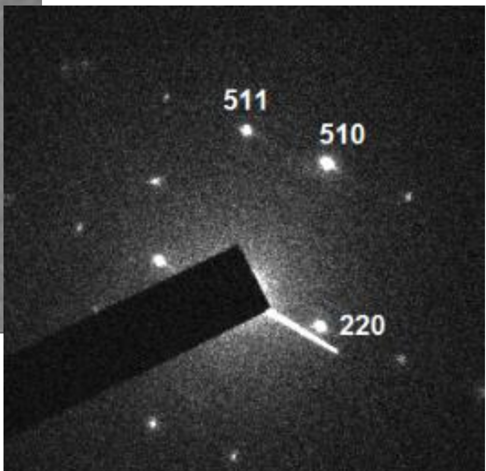


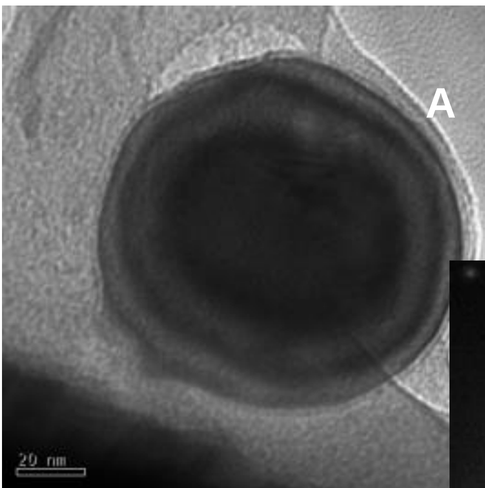
Figura 2.17. Imagen de TEM que ilustra la dispersión de las partículas de cementita en las interfaces de las cintas o placas de ferrita (antes martensita), después de un recocido de 30 min a 680 °C en un acero de medio carbono [94].

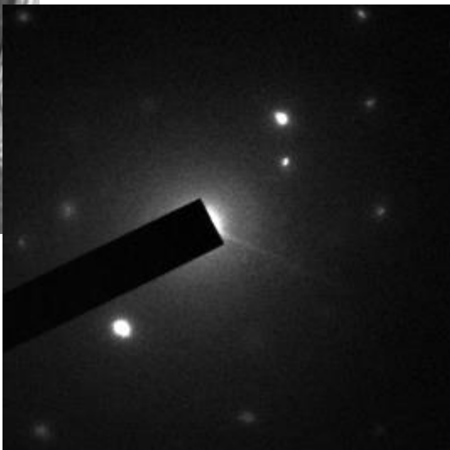


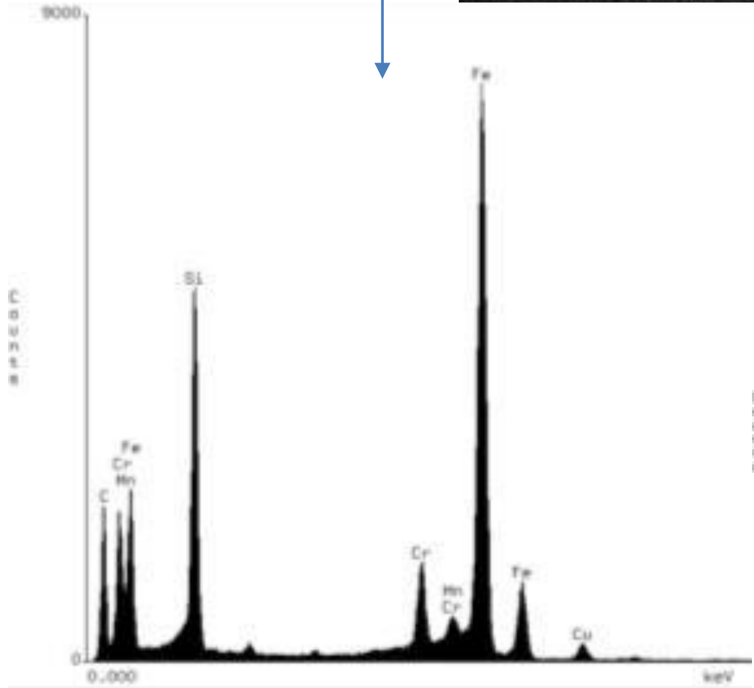
. Imágenes TEM de campo brillante las cuales muestran (a) un precipitado de cementita de borde de grano ubicado una triple unión de granos austenita (señalados por la flecha) en una muestra preparada utilizando una técnica de electropulido convencional (650 °C por 2 s).











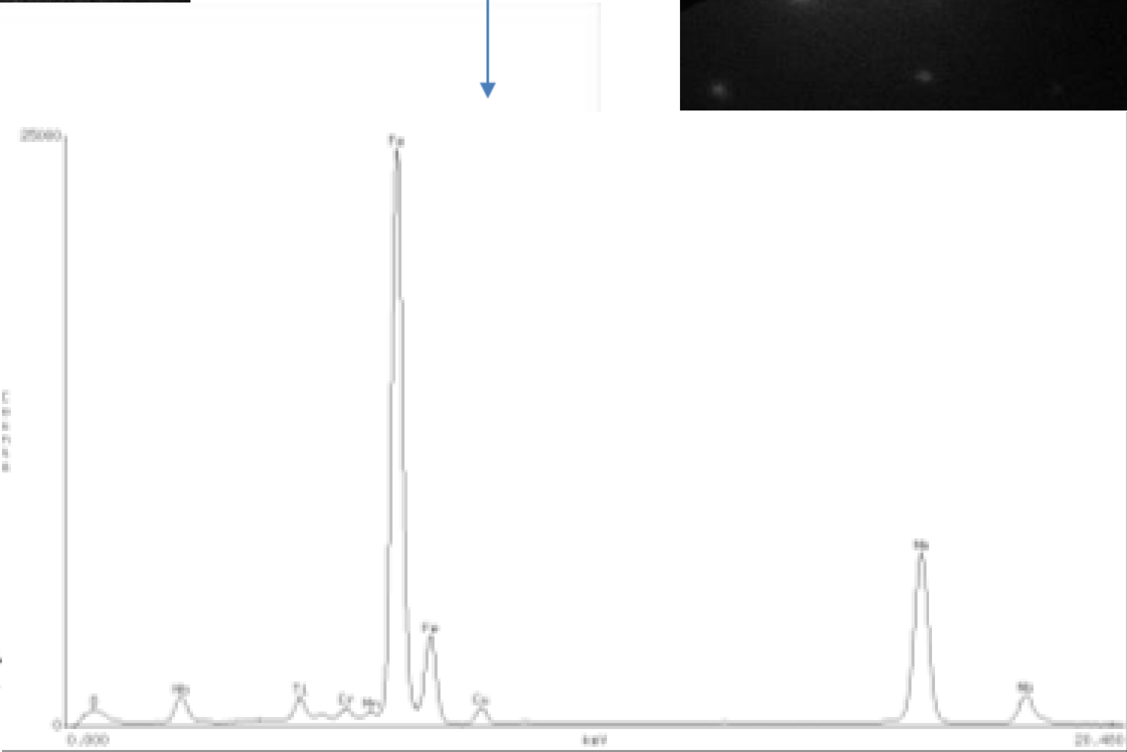


Imagen TEM de campo claro de un precipitado de borde de grano de FeSi con morfología cuboide. Tesis w. Perez, J.J. Olaya

RESUMEN

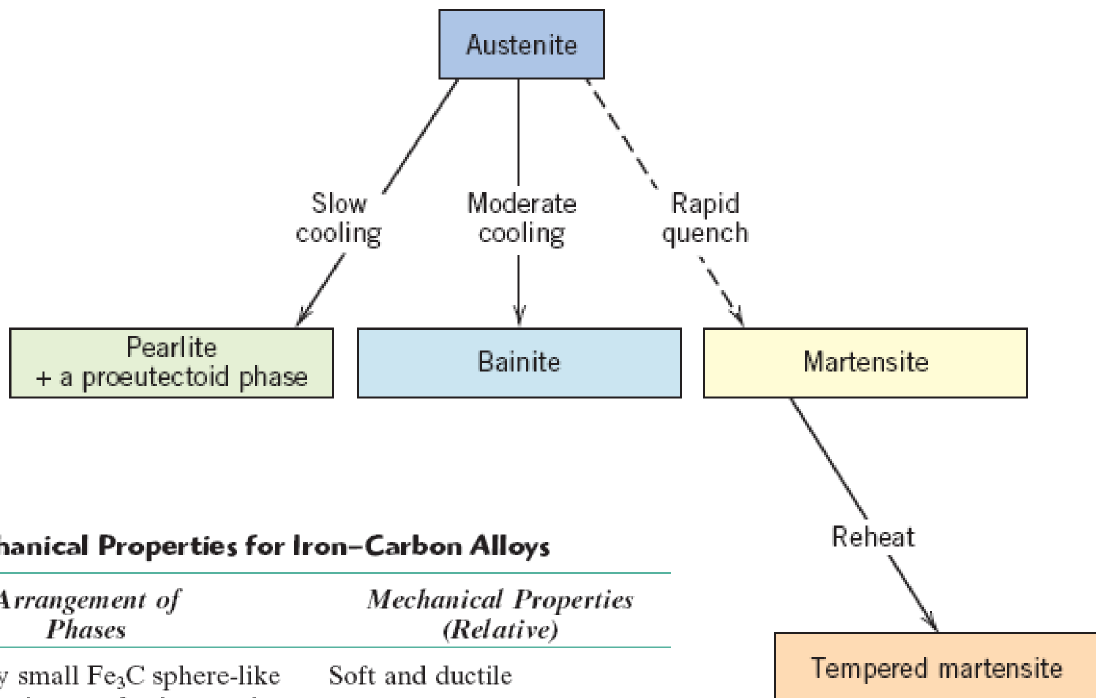
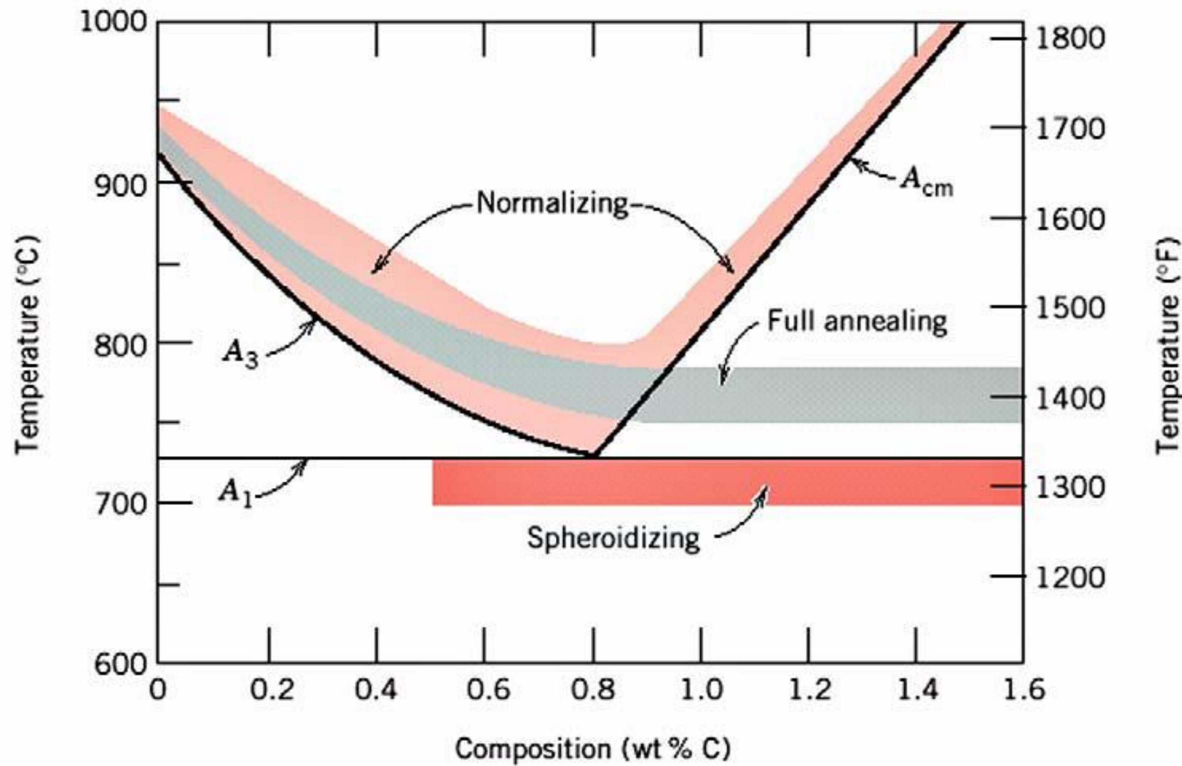


Table 10.2 Summary of Microstructures and Mechanical Properties for Iron–Carbon Alloys

Microconstituent	*Phases Present*	*Arrangement of Phases*	*Mechanical Properties (Relative)*
Spheroidite	α Ferrite + Fe_3C	Relatively small Fe_3C sphere-like particles in an α-ferrite matrix	Soft and ductile
Coarse pearlite	α Ferrite + Fe_3C	Alternating layers of α ferrite and Fe_3C that are relatively thick	Harder and stronger than spheroidite, but not as ductile as spheroidite
Fine pearlite	α Ferrite + Fe_3C	Alternating layers of α ferrite and Fe_3C that are relatively thin	Harder and stronger than coarse pearlite, but not as ductile as coarse pearlite
Bainite	α Ferrite + Fe_3C	Very fine and elongated particles of Fe_3C in an α-ferrite matrix	Hardness and strength greater than fine pearlite; hardness less than martensite; ductility greater than martensite
Tempered martensite	α Ferrite + Fe_3C	Very small Fe_3C sphere-like particles in an α-ferrite matrix	Strong; not as hard as martensite, but much more ductile than martensite
Martensite	Body-centered tetragonal, single phase	Needle-shaped grains	Very hard and very brittle

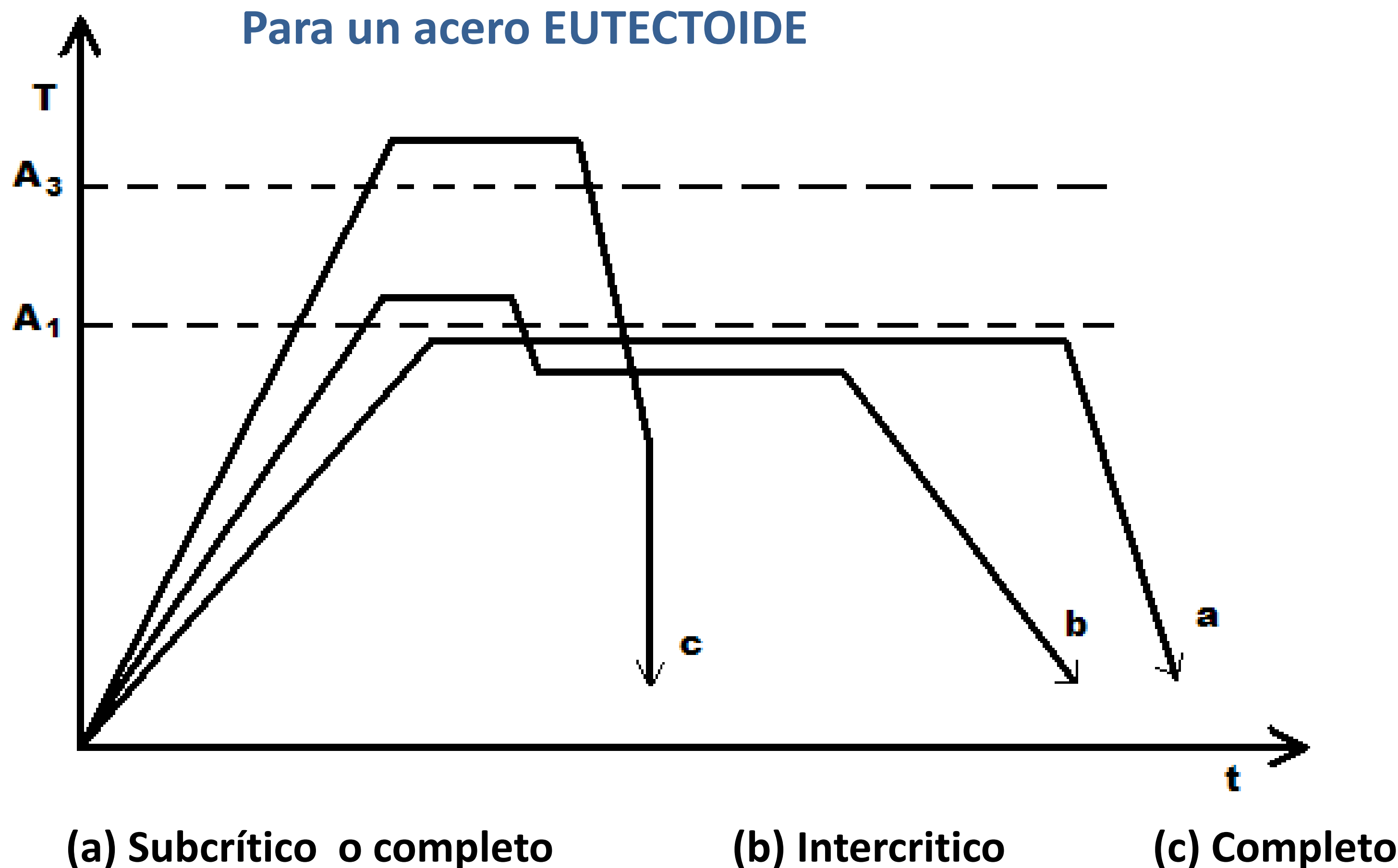
TRATAMIENTOS TÉRMICOS



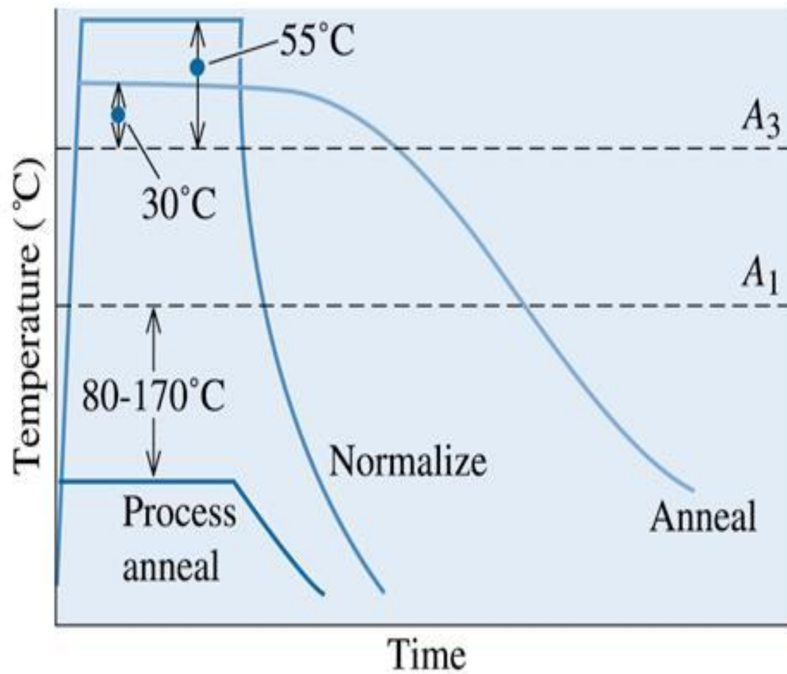
- **Recocido Total: Se utiliza para aceros que tendrán una deformación plástica extensa. Se logra una estructura de perlita gruesa y posiblemente una fase proeutectoide que es suave o dúctil.**
- **Normalizado: Afina el tamaño de grano, incrementa la resistencia y reduce las segregaciones.**
- **Esferoidización: En aceros de medio o alto carbono. Se aumenta la ductilidad. Se calienta el acero justo por debajo de la temperatura eutectoide a aproximadamente 700°C.**
- **Recocido de proceso y-o relajación de tensiones. La deformación plástica a bajas temperaturas genera cambio en la forma del grano, endurecimiento por deformación y aumento de la densidad de dislocaciones. La estructutura puede recuperarse mediante un recocido que tiene las siguientes etapas: Recuperación, Recristalización y Crecimiento de grano.**

RECOCIDO

Los aceros se pueden recocer para facilitar el trabajo en frío o el maquinado, mejorar las propiedades mecánicas o eléctricas o promover la estabilidad dimensional.
También hay un alivio de tensiones generadas por procesos de deformación plástica, transformaciones de fases o enfriamiento no uniforme.



(a) Subcrítico o completo **(b) Intercritico** **(c) Completo**



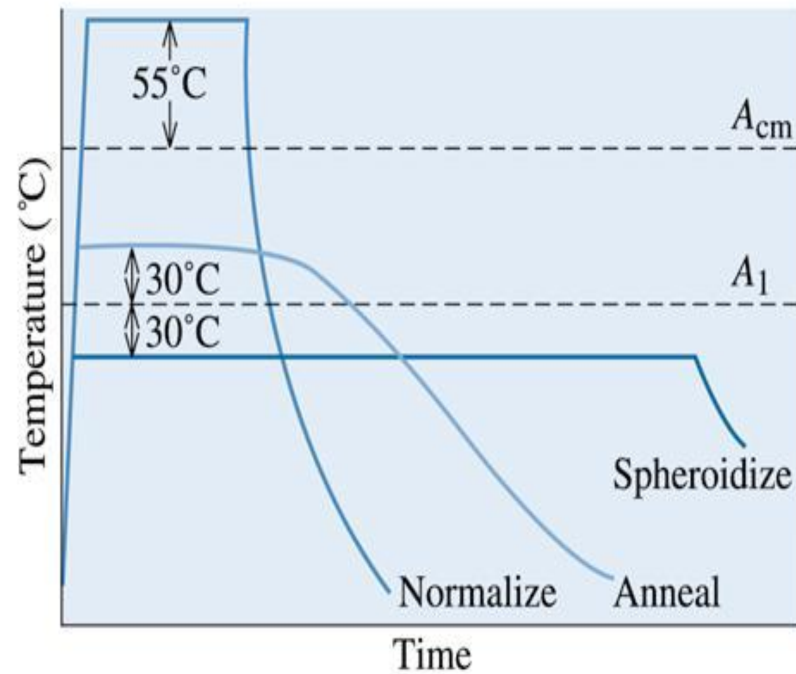


Figure 12.4 Schematic summary of the simple heat treatments for (a) hypoeutectoid steels and (b) hypereutectoid steels.

The process of stress relieving consists of heating materials uniformly to a temperature below the lower critical temperature, holding at this temperature for sufficient time, followed by uniform cooling. Plain carbon steels and low alloy steels generally temperature is limited to 600 ^{o}C. Higher temperature is used for high alloy steels

RECOCIDO COMPLETO

Depende del contenido de carbono.

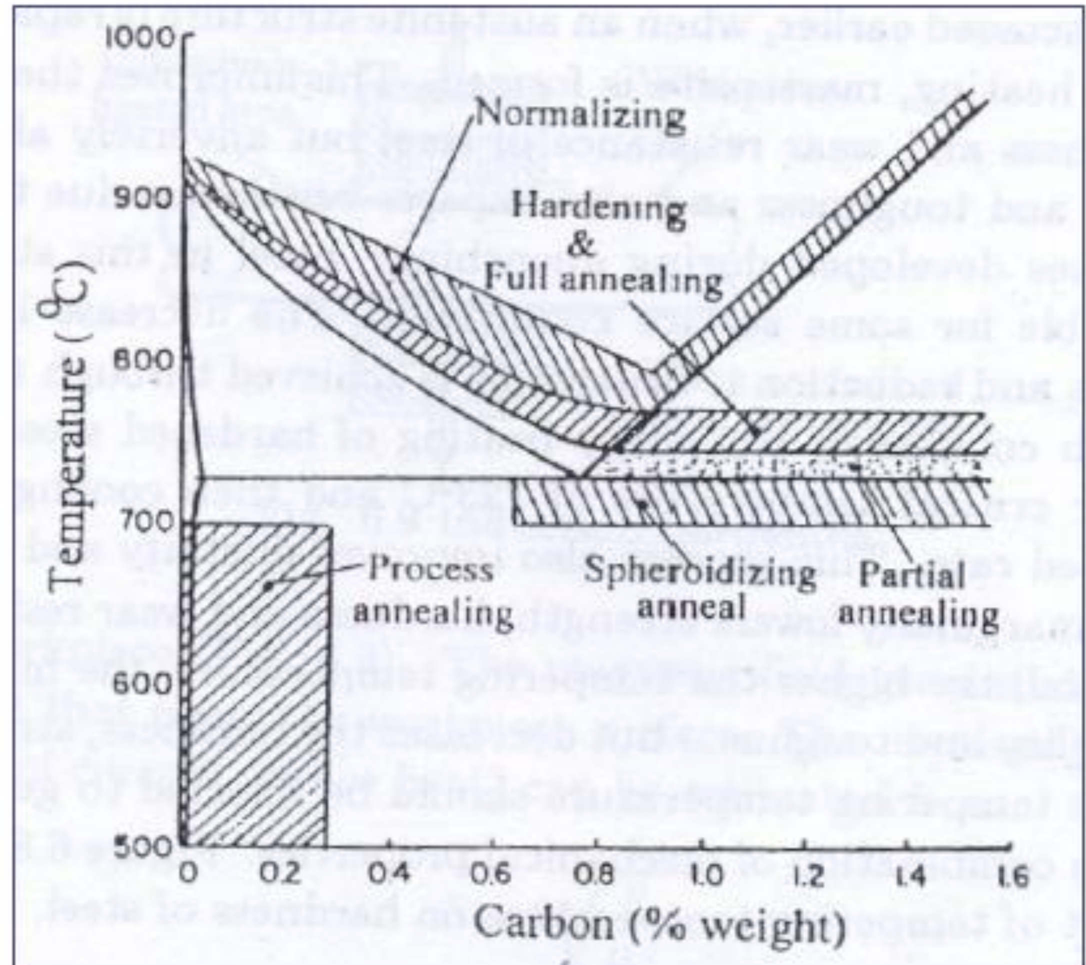
En el acero hipoeutectoide hay formaciòn de ferrita proeutectoide y perlita gruesa con un elevado espaciamiento interlaminar.

En el acero hipereutectoides hay esforoidezaciòn o aglomeraciòn de carburos proeutectoides para evitar la red interconectada de carburos en los bordes de grano de la austenita.

Produce una microestructura en equilibrio. Enfriamiento en horno y se logra perlita o ferrita gruesa.

Se remueven esfuerzos internos, se reduce la fragilidad, resistencia y la dureza.

<u>Aparece un recocido de homogenizaciòn</u>. Se realiza previo a laminación en caliente o forja. Se realiza en el campo de la austenita para la segregaciòn.



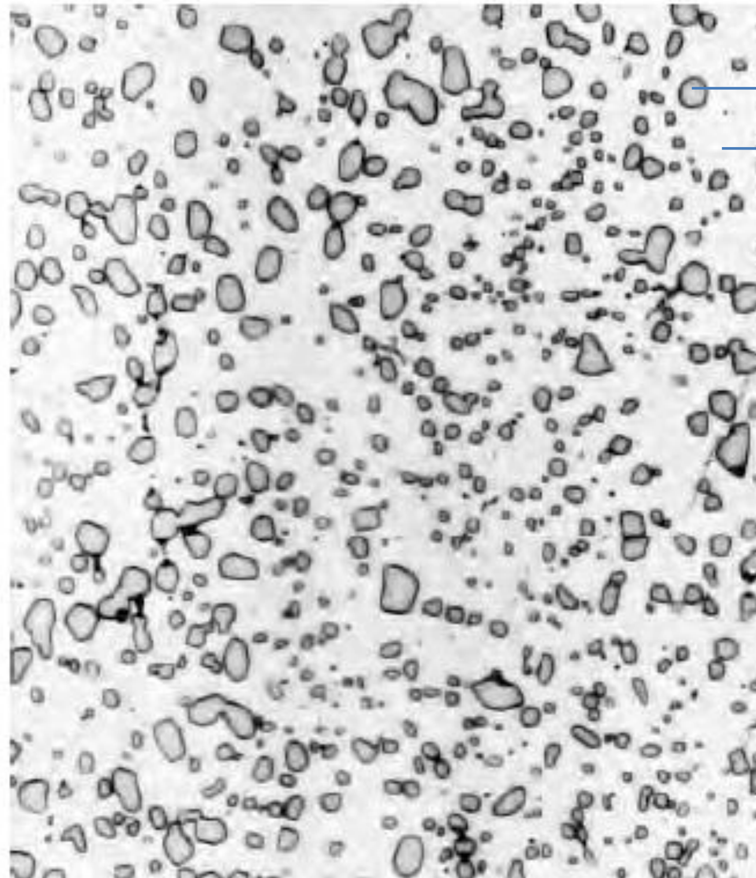
RECOCIDO DE GLOBULIZACIÒN O ESFEROIDIZACIÒN

Produce una estructura de carburos globulares en una matriz de ferrita
Busca minimizar la dureza
Máxima ductilidad
Máxima maquinabilidad

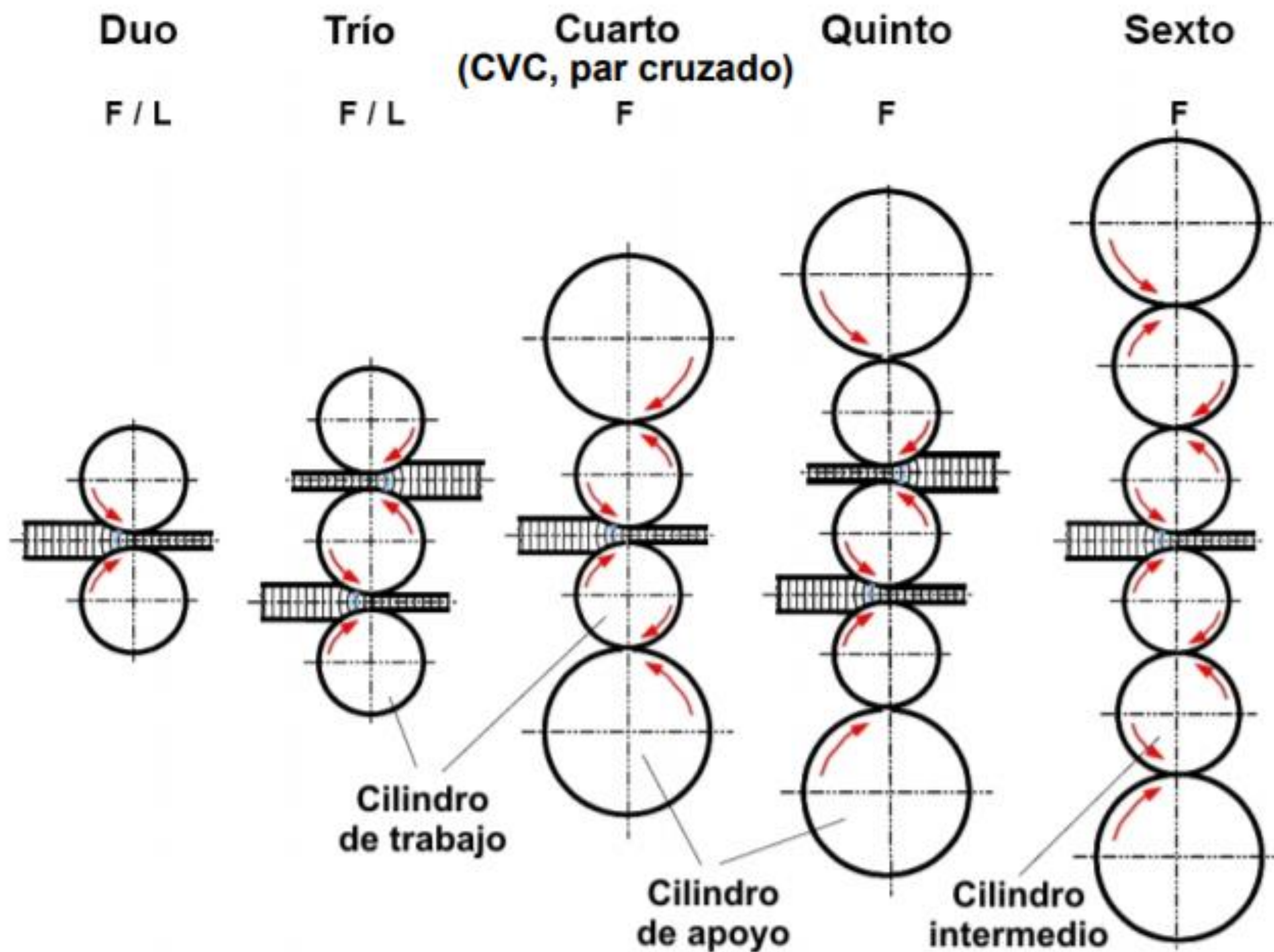
El tiempo de sostenimiento puede ser de 15 – 25 horas

Un acero bainítico o perlítico es calentado por debajo de la temperatura eutectoide y se mantiene esta temperatura por largos periodos de tiempo, se forma una estructura esferoidal. Se favorece procesos de difusiòn.

Las estructuras esferoidales son las mas estables.



La austenita no homogénea o carburos no disueltos promueven la formación de estructuras esferoidales. La austenita homogénea promueve la perlita.



http://www.brchina.com/downloads/spanish/Mein_Buch_es.pdf

RECOCIDO DE PROCESO

En el proceso de recuperación Parte de la energía de deformación interna almacenada de la deformación plástica se libera debido al movimiento de las dislocaciones como consecuencia de la difusión atómica a temperaturas elevadas. Se reduce el número de dislocaciones y se recupera la conductividad eléctrica y térmica.

En el proceso de recristalización Se genera un nuevo conjunto de granos equiaxiales, libres de deformación.

Material deformado



(a)

Etapa inicial - 580°C, 3 s



(b)

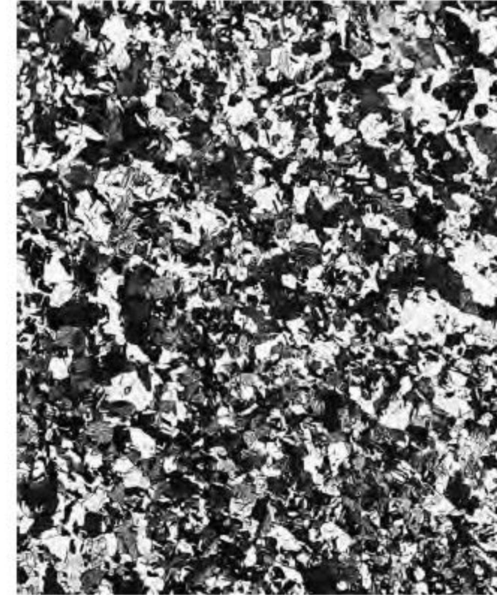
Figure 7.21 Photomicrographs showing several stages of the recrystallization and grain growth of brass. (a) Cold-worked (33%CW) grain structure. (b) Initial stage of recrystallization after heating 3 s at 580°C (1075°F); the very small grains are those that have recrystallized. (c) Partial replacement of cold-worked grains by recrystallized ones (4 s at 580°C). (d) Complete recrystallization (8 s at 580°C). (e) Grain growth after 15 min at 580°C. (f) Grain growth after 10 min at 700°C (1290°F). All photomicrographs 75×. (Photomicrographs courtesy of J. E. Burke, General Electric Company.)

Sustitución de granos reris. X granos deformados., 580°C, 4 s.



(c)

Finalización recristalización, 580°C, 8s



(d)

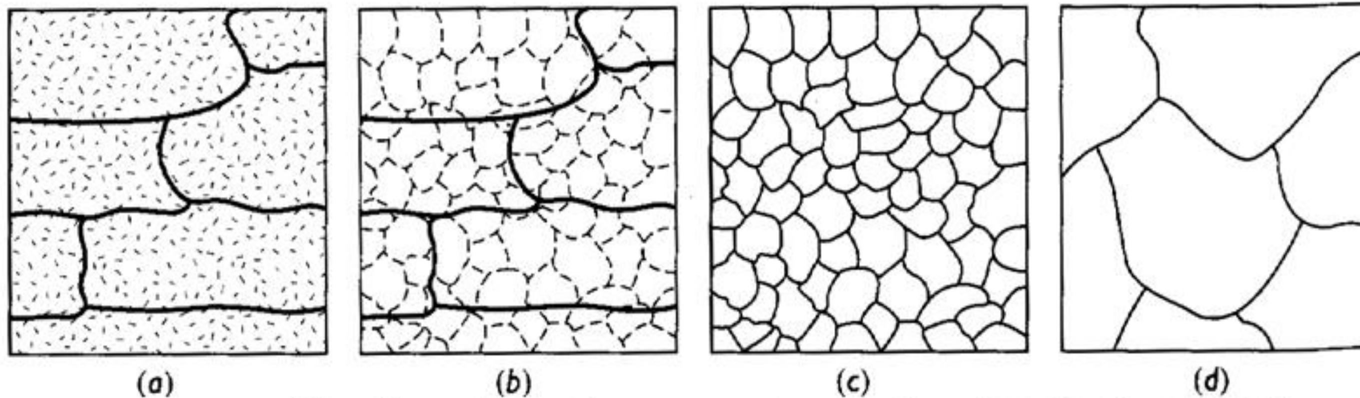


(e) **580°C, 15 min**

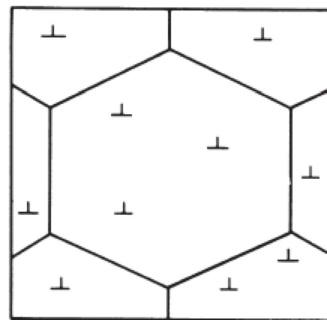


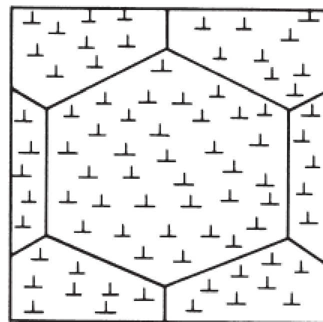
(f) **700 °C, 10 min**

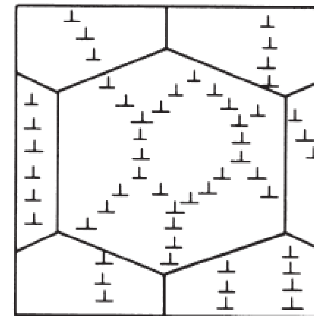
Figure 7.21 (continued)

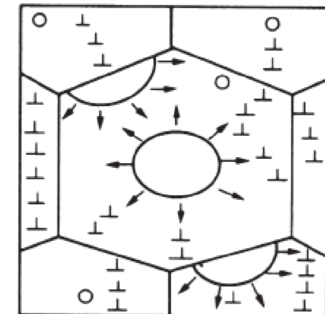


The effect of annealing temperature on the microstructure of cold-worked metals: (a) cold worked, (b) after recovery, (c) after recrystallization, and (d) after grain growth.









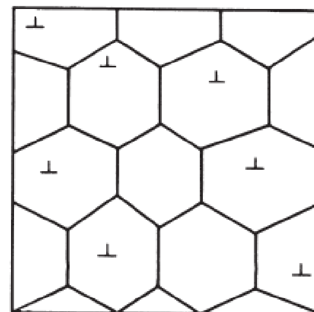


Fig. 14.10. How the microstructure of a metal is changed by plastic working and annealing. (**a**) If the starting metal has already been annealed it will have a comparatively low dislocation density. (**b**) Plastic working greatly increases the dislocation density. (**c**) Annealing leads initially to recovery – dislocations move to low-energy positions. (**d**) During further annealing new grains nucleate and grow. (**e**) The fully recrystallised metal consists entirely of new undeformed grains.

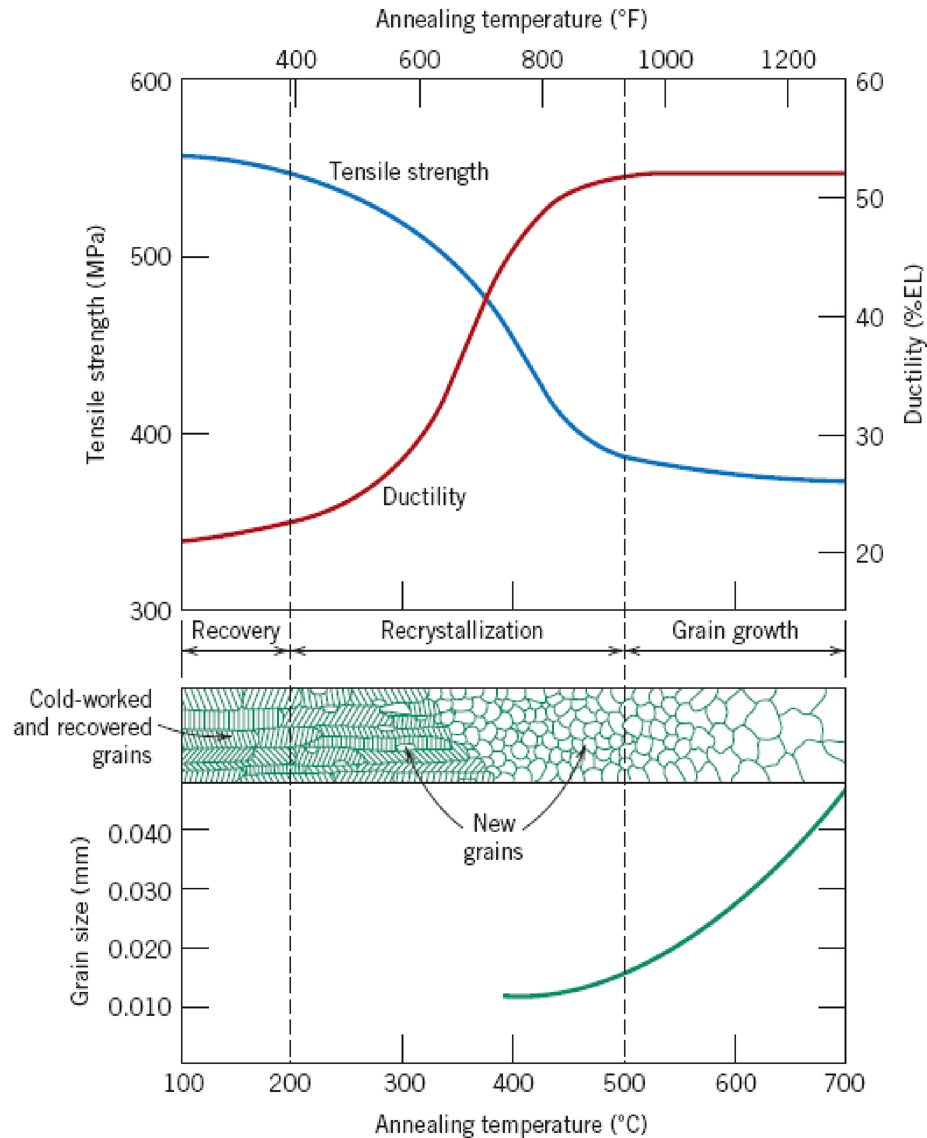


Figure 7.22 The influence of annealing temperature (for an annealing time of 1 h) on the tensile strength and ductility of a brass alloy. Grain size as a function of annealing temperature is indicated. Grain structures during recovery, recrystallization, and grain growth stages are shown schematically. (Adapted from G. Sachs and K. R. Van Horn, *Practical Metallurgy, Applied Metallurgy and the Industrial Processing of Ferrous and Nonferrous Metals and Alloys*, American Society for Metals, 1940, p. 139.)

La temperatura de recristalización o la temperatura a la cual se produce la recristalización en una hora. Esta temperatura esta entre 1/3 y ½ la temperatura de fusión. Depende de la cantidad de trabajo en frío. Con mayores porcentajes de deformación se logran menores temperaturas de recristalización.

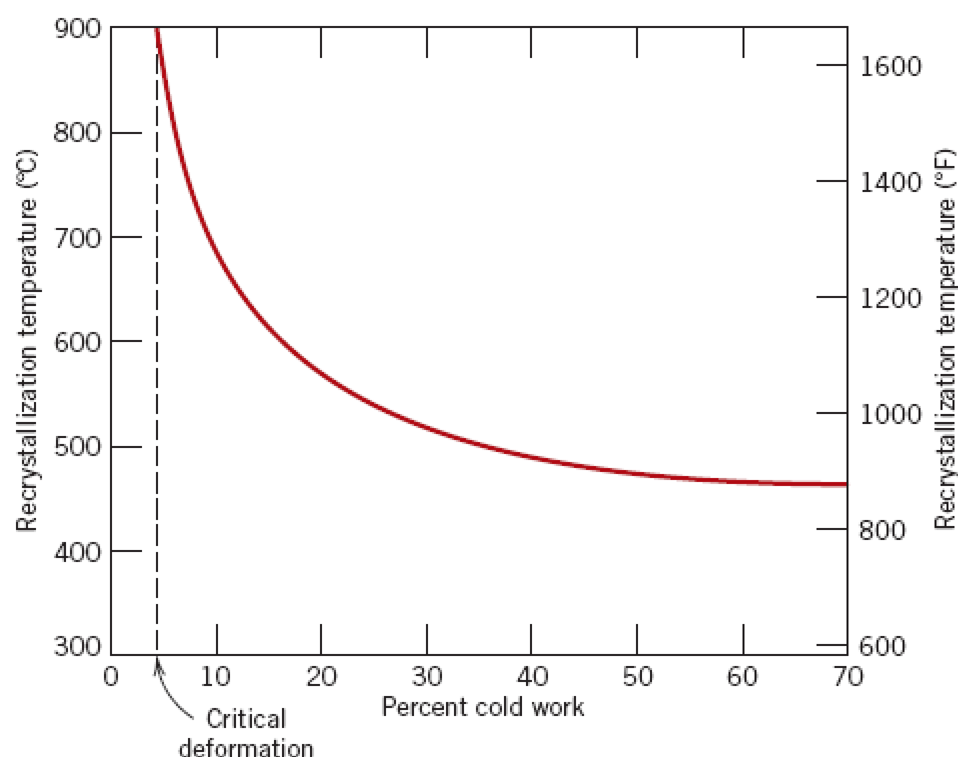


Figure 7.23 The variation of recrystallization temperature with percent cold work for iron. For deformations less than the critical (about 5% CW), recrystallization will not occur.

Table 7.2 Recrystallization and Melting Temperatures for Various Metals and Alloys

	Recrystallization Temperature		*Melting Temperature*	
Metal	*°C*	*°F*	*°C*	*°F*
Lead	−4	25	327	620
Tin	−4	25	232	450
Zinc	10	50	420	788
Aluminum (99.999 wt%)	80	176	660	1220
Copper (99.999 wt%)	120	250	1085	1985
Brass (60 Cu–40 Zn)	475	887	900	1652
Nickel (99.99 wt%)	370	700	1455	2651
Iron	450	840	1538	2800
Tungsten	1200	2200	3410	6170

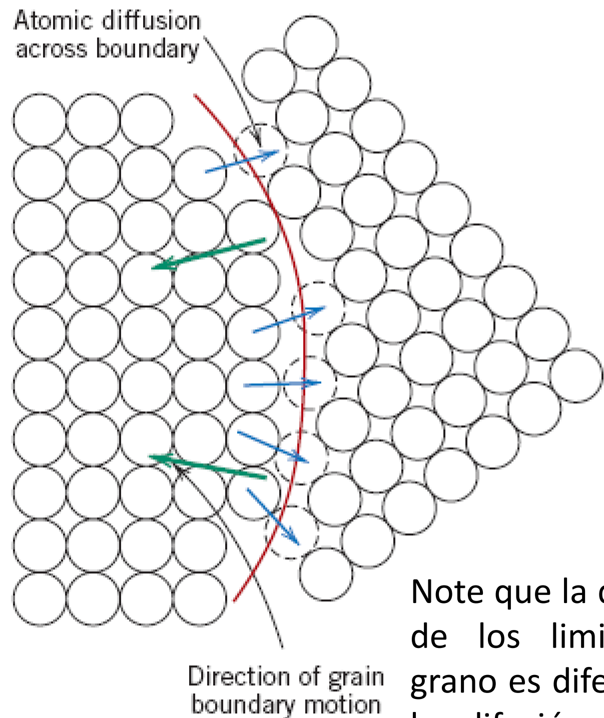


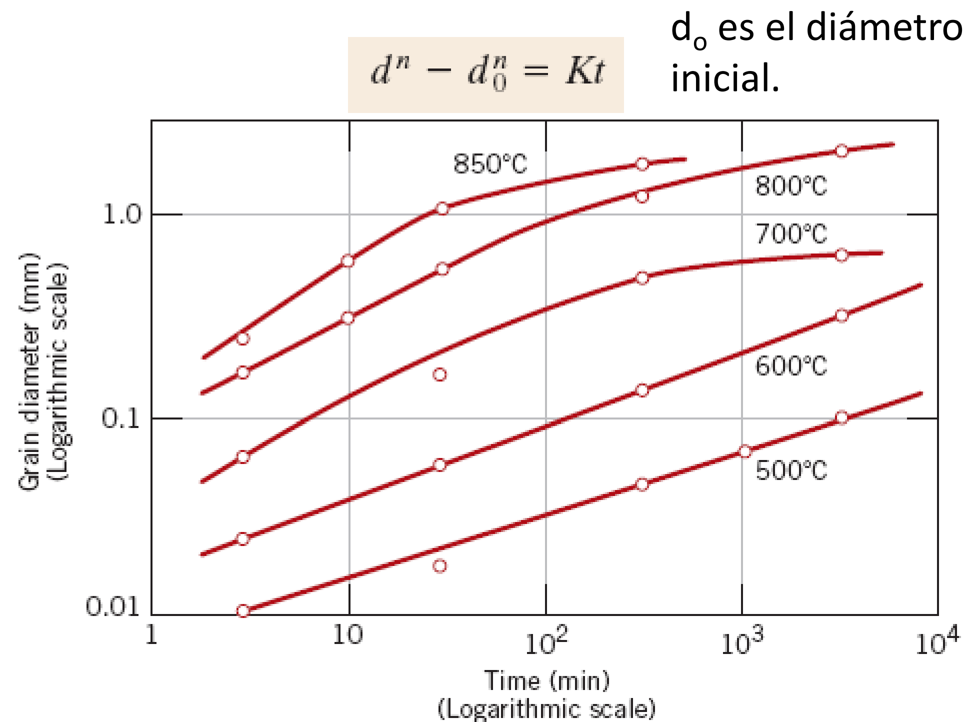
Figure 7.24 Schematic representation of grain growth via atomic diffusion. (From Van Vlack, Lawrence H., *Elements of Materials Science and Engineering*, © 1989, p. 221. Adapted by permission of Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ.)

Con el aumento del tamaño de grano, se logra disminuir el área total del limite y se reduce la energía total del sistema.

Note que la difusión de los limites de grano es diferente a la difusión de los átomos.

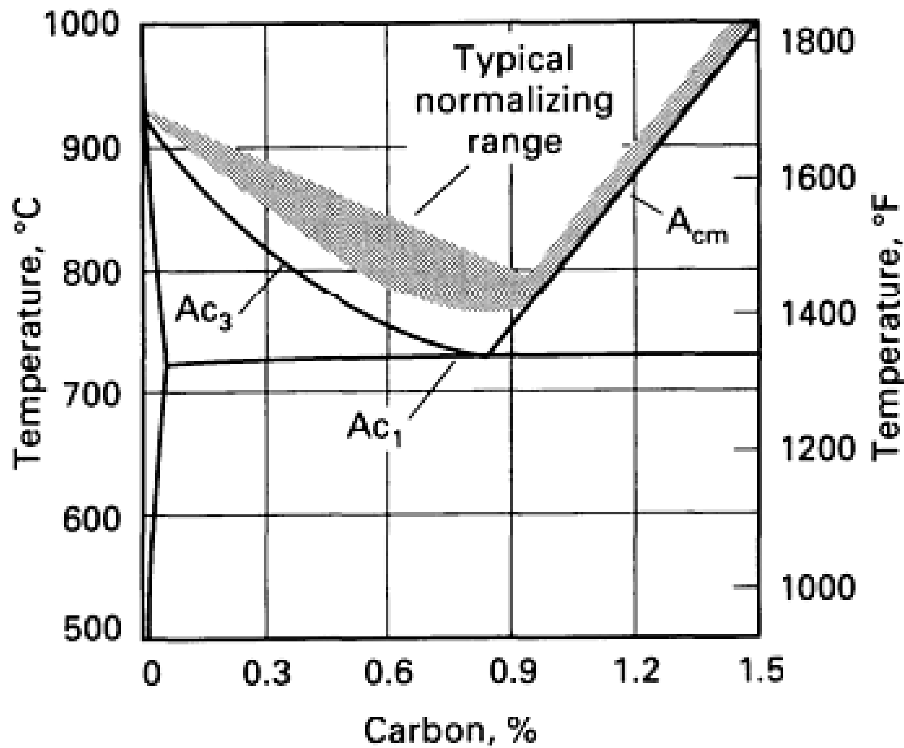
$$d^n - d_0^n = Kt$$

d_o es el diámetro inicial.



El crecimiento del grano se produce por la difusión de los limites de grano debido a la difusión de los átomos de un límite al vecino. Los granos crecen a expensas de los granos pequeños.

NORMALIZADO

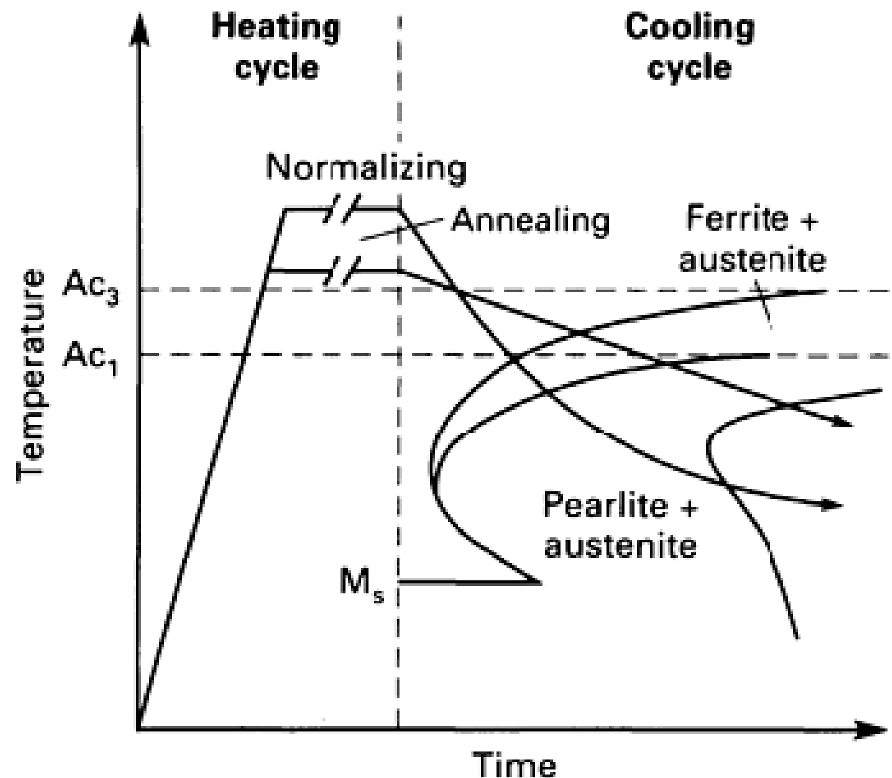


Se aumenta la homogenidad de la austenita, es decir, se logra una mejor dispersiòn de la cementita y ferrita en la estructura.

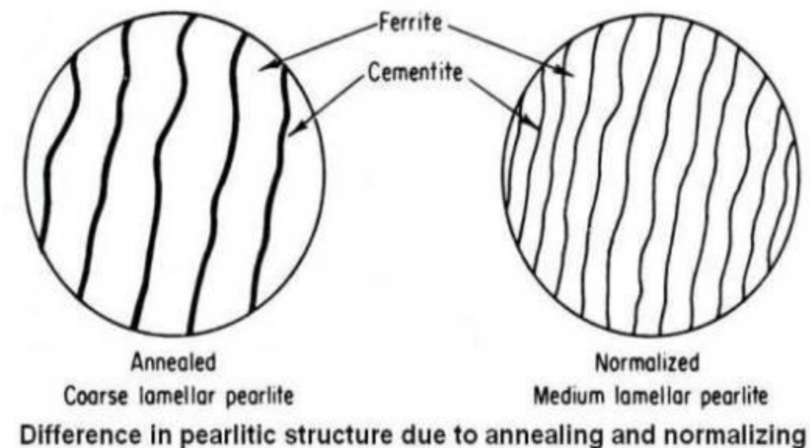
- Calentamiento hasta austenizaciòn completa seguido de un enfriamiento en aire.
- Se logra un grano fino y una composición homogénea.
- Se forma mas perlita, laminas mas delgadas y estructura mas cerrada.
- Estructura final: Perlita y se elimina la red de carburos.

Puede incrementar la dureza o la resistencia, pero depende de la historia térmica y mecánica del producto.

1. Aumentar la maquinabilidad
2. Refinamiento de la estructura de grano
3. Homogenización (productos laminados, colados forjados)
4. Modificación de los esfuerzos residuales. Alivio de tensiones.



800
700
600
500
400
300
200
100
0
Temperature (°C)
1400
1200
1000
800
600
400
200
Temperature (°F)
10^{-1} 1 10 10^2 10^3 10^4 10^5
Time (s)
Eutectoid temperature
Pearlite
Austenite
A
B
Slow cooling curve (full anneal)
Moderately rapid cooling curve (normalizing)
M(start)
M(50%)
M(90%)
Denotes a transformation during cooling
Fine pearlite
Coarse pearlite



Difference in pearlitic structure due to annealing and normalizing

Permanencia a Temperatura máxima

- No debe sobrepasarse la temperatura indicada para cada acero pues se corre el riesgo de aumentar innecesariamente el tamaño de grano de los constituyentes. Más arriba de 850°C y hasta los 1000°C el mayor crecimiento de los granos de austenita se da y en lo posible debe evitarse.

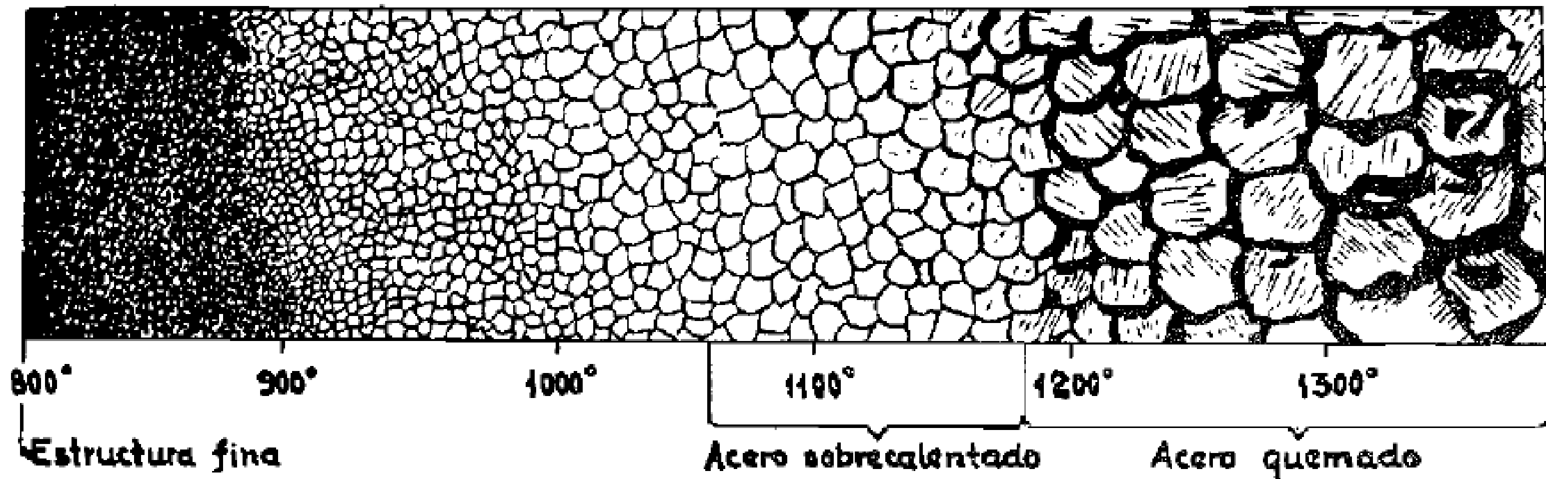


FIGURA 63

Aumento producido en el tamaño del grano de un acero de 0,60 % de carbono, por calentamiento a diferentes temperaturas.

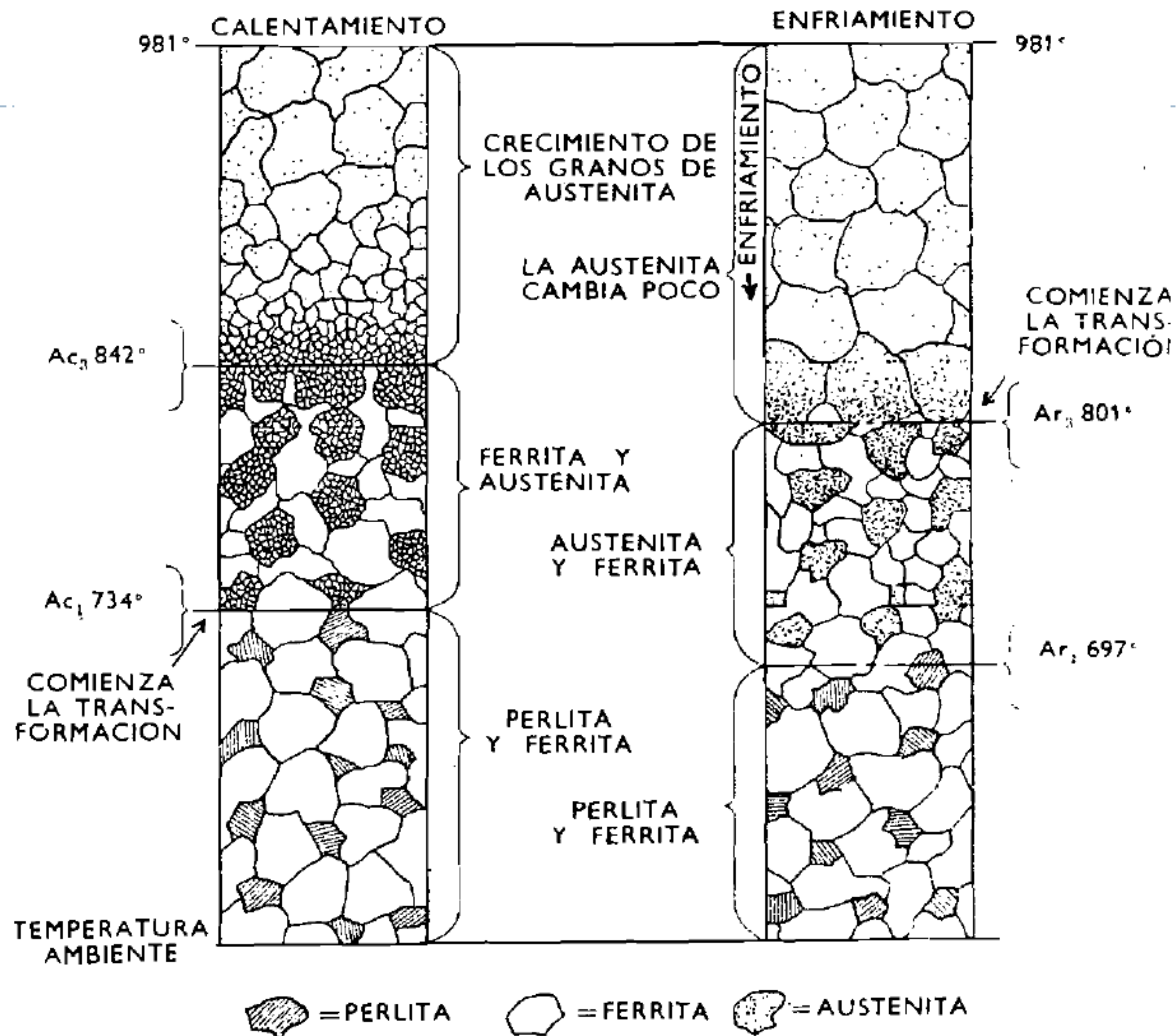


FIGURA 66

Cambios estructurales que experimenta en los calentamientos y enfriamientos lentos un acero de 0,25 % de carbono.

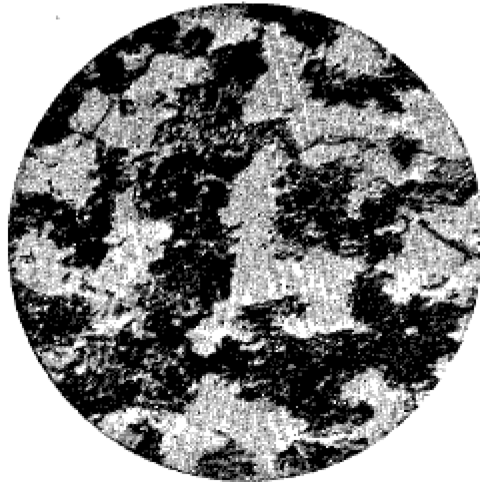


FIGURA 64
× 50
Acero de 0,45 % de carbono calentado a 1.000° y enfriado en el horno.

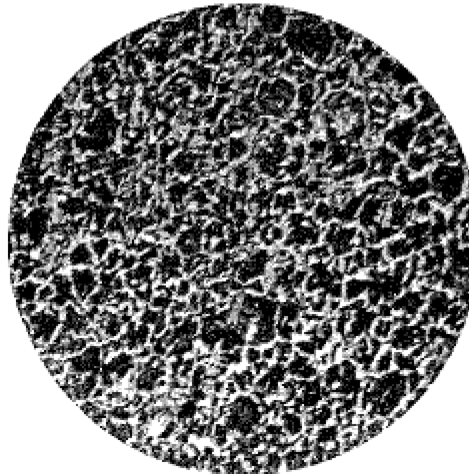


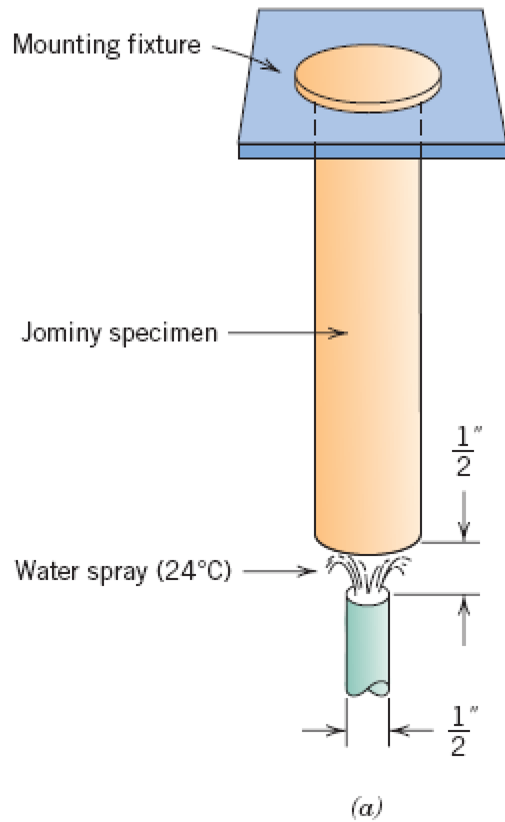
FIGURA 65
× 50
Acero de 0,45 % de carbono calentado a 800° y enfriado en el horno.

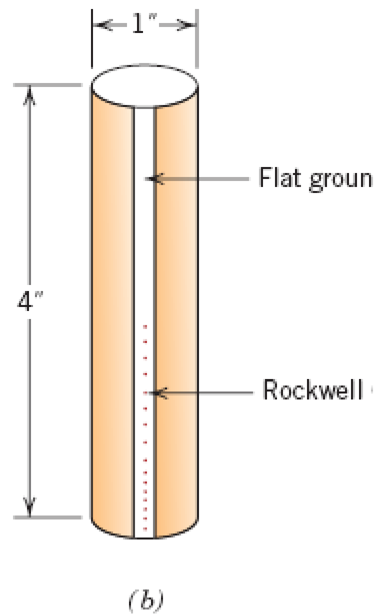
ACERO QUEMADO

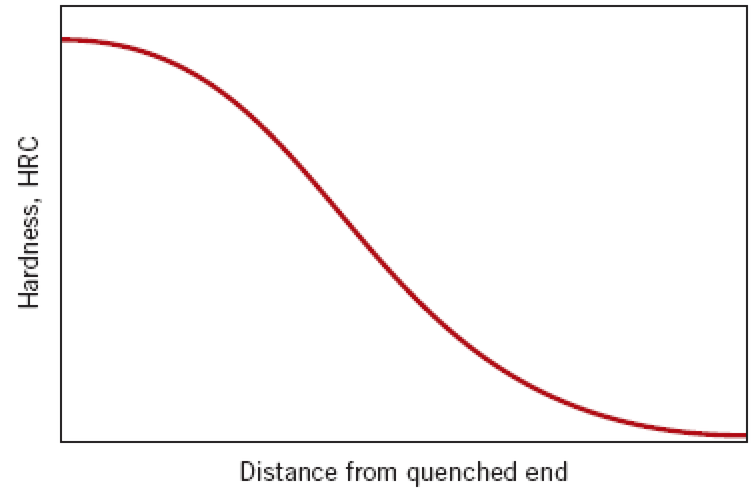
Cuando se calienta el acero a temperaturas cerca de 1350° se forma en los bordes de grano Oxido que hacen imposible la regeneracion de la estructura

- **AUMENTO DEL TAMAÑO DE GRANO**
- Cuando se deja mucho tiempo a altas temperaturas el tamano de grano aumenta formando estructuras groseras

TEMPLABILIDAD







Ensayo Jominy

H_2O

Superficie desbastada para medir la dureza Rc

End-quench hardenability

Hardness, HRC

70 60 50 40 30 20

0 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0

Distance from quenched end (in.)

Curva de Templabilidad (dureza vs profundidad)

800 600 400 200 0

1400 1200 1000 800 600 400 200 0

Temperature (°F)

Ⓐ Ⓑ Ⓒ Ⓓ

Austenite → Pearlite

Velocidades de enfriamiento

M (start)

Austenite → Martensite

Ⓐ Martensite

Ⓑ Martensite and pearlite

Ⓒ Fine pearlite

Ⓓ Pearlite

Si no hay difusión de carbono se forma martensita

Si hay difusión de carbono se forma perlita

Cooling transformation diagram

Cooling curves

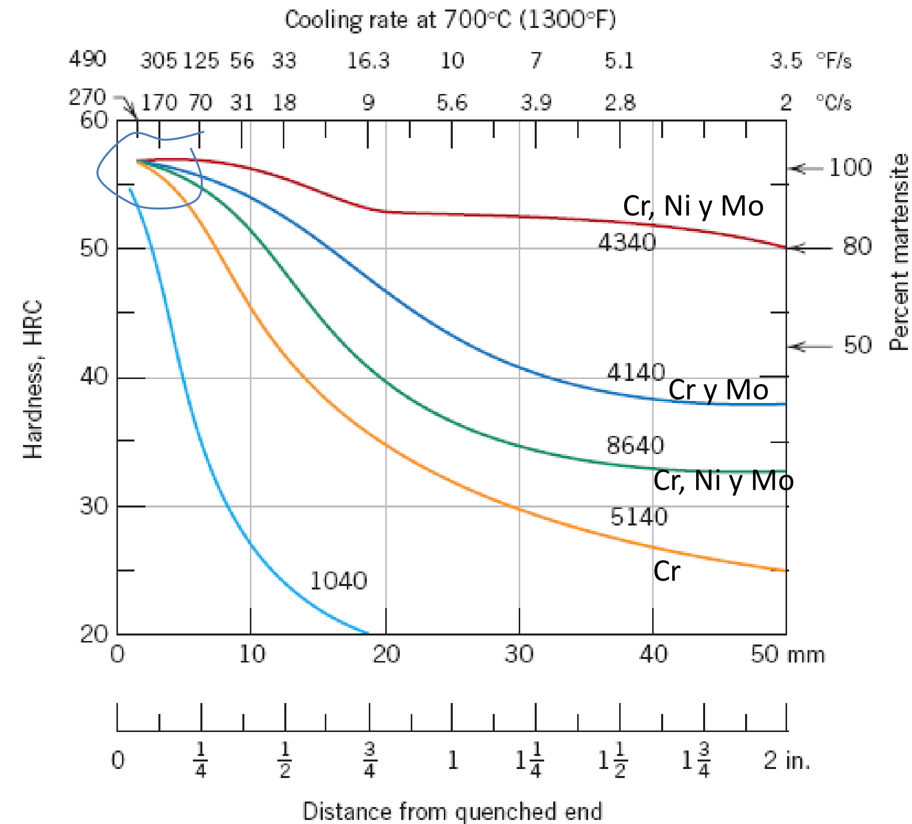
Transformation during cooling

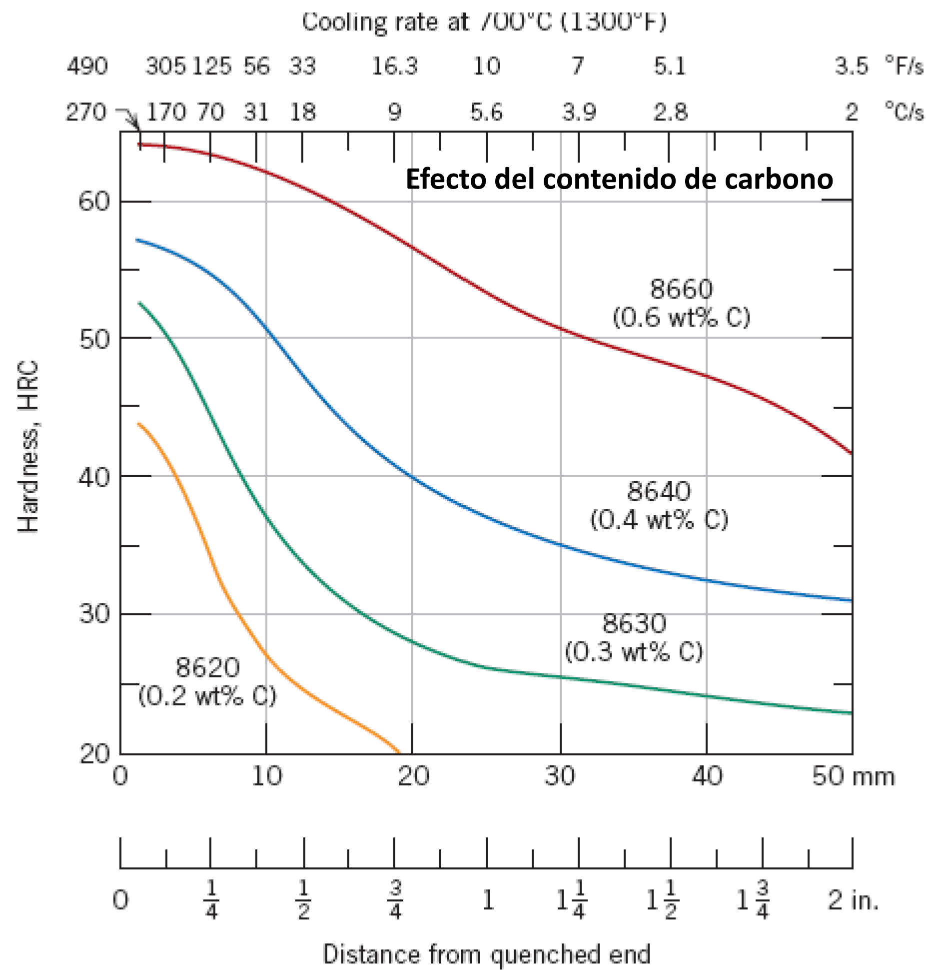
0.1 1 10 10^2 10^3

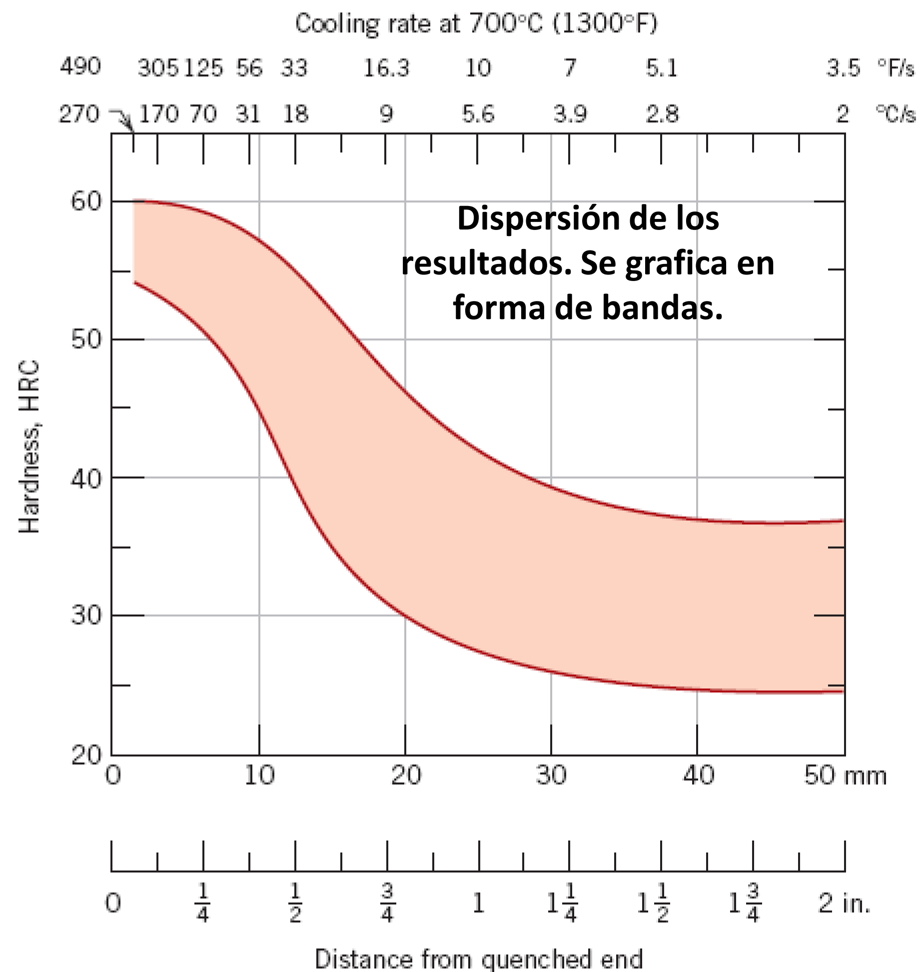
Time (s)

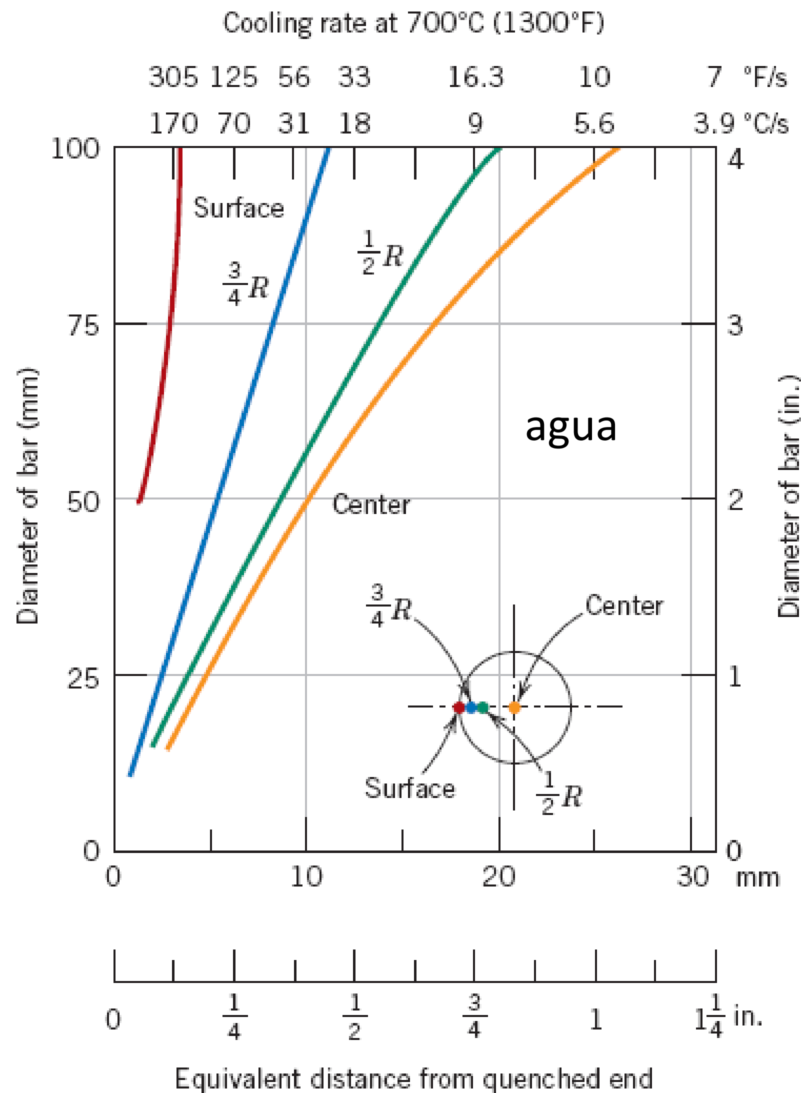
La capacidad de la aleación de acero para transformarse en martensita. No es dureza.

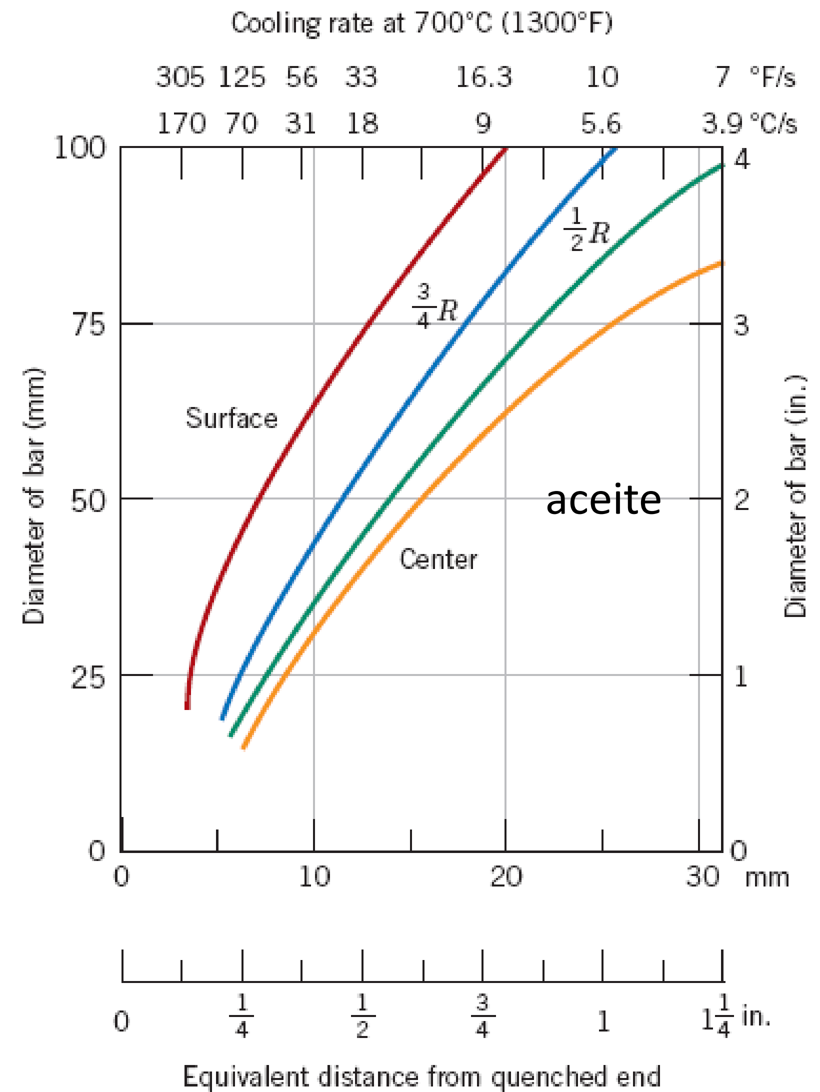
Es la medida cualitativa de la velocidad a la cual desaparece la dureza con la distancia en el interior de una probeta como resultado de menor concentración de martensita.




Cooling rate at 700°C (1300°F)
490 305 125 56 33 16.3 10 7 5.1 3.5 °F/s
270 170 70 31 18 9 5.6 3.9 2.8 2 °C/s
Efecto del contenido de carbono
8660 (0.6 wt% C)
8640 (0.4 wt% C)
8630 (0.3 wt% C)
8620 (0.2 wt% C)
Hardness, HRC
20 30 40 50 60
0 10 20 30 40 50 mm
0 1/4 1/2 3/4 1 1 1/4 1 1/2 1 3/4 2 in.
Distance from quenched end


Cooling rate at 700°C (1300°F)
490 305 125 56 33 16.3 10 7 5.1 3.5 °F/s
270 170 70 31 18 9 5.6 3.9 2.8 2 °C/s
Dispersión de los resultados. Se grafica en forma de bandas.
Hardness, HRC
20 30 40 50 60
0 10 20 30 40 50 mm
0 1/4 1/2 3/4 1 1 1/4 1 1/2 1 3/4 2 in.
Distance from quenched end

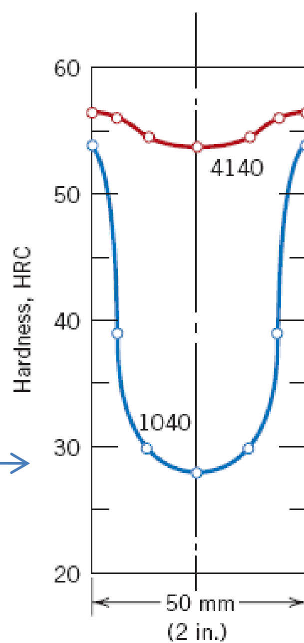




Las velocidades de enfriamiento son diferentes en función del diámetro de la probeta y con 4 distancias radiales

Distribución radial de la dureza

Influencia de la composición química



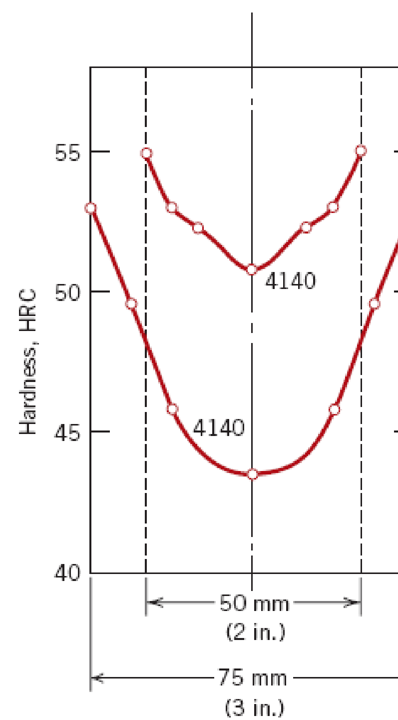
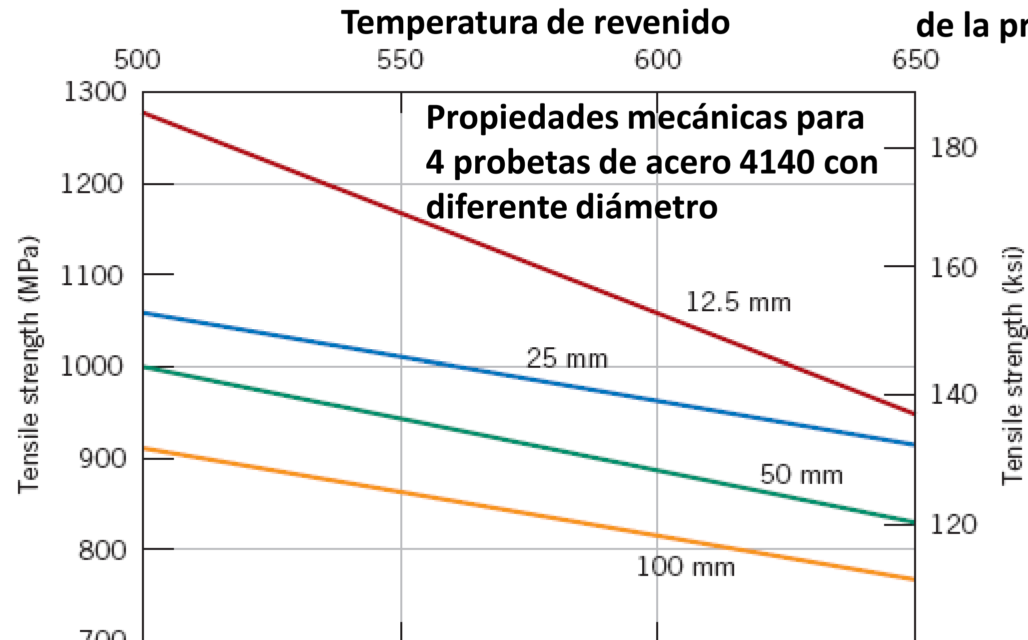


Figure 11.18 Radial hardness profiles for (*a*) 50 mm (2 in.) diameter cylindrical 1040 and 4140 steel specimens quenched in mildly agitated water, and (*b*) 50 and 75 mm (2 and 3 in.) diameter cylindrical specimens of 4140 steel quenched in mildly agitated oil.

Influencia del diámetro

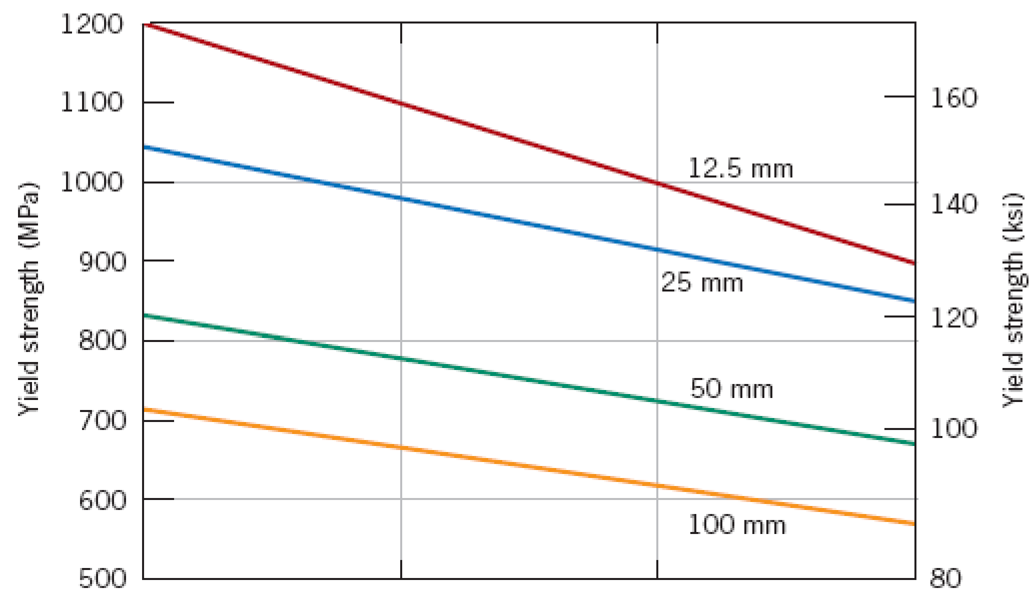
La dureza disminuye con el diámetro y hacia el centro de la probeta

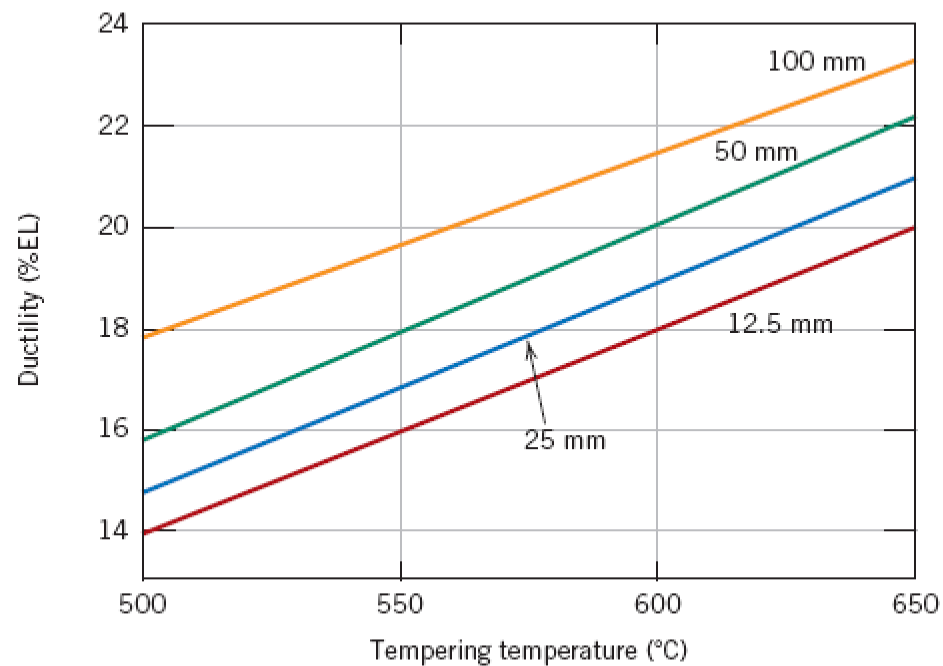
Temperatura de revenido



Propiedades mecánicas para 4 probetas de acero 4140 con diferente diámetro

Figure 11.20 For cylindrical specimens of an oil-quenched 4140 steel, (*a*) tensile strength, (*b*) yield strength, and (*c*) ductility (percent elongation) versus tempering temperature for diameters of 12.5 mm (0.5 in.), 25 mm (1 in.), 50 mm (2 in.), and 100 mm (4 in.).


1200
1100
1000
900
800
700
600
500
Yield strength (MPa)
160
140
120
100
80
Yield strength (ksi)
12.5 mm
25 mm
50 mm
100 mm
(b)


24
22
20
18
16
14
Ductility (%EL)
100 mm
50 mm
12.5 mm
25 mm
500
550
600
650
Tempering temperature (°C)
(c)

ENDURECIMIENTO POR PRECIPITACIÓN

Tratamiento térmico de solución. Se forma una solución monofásica

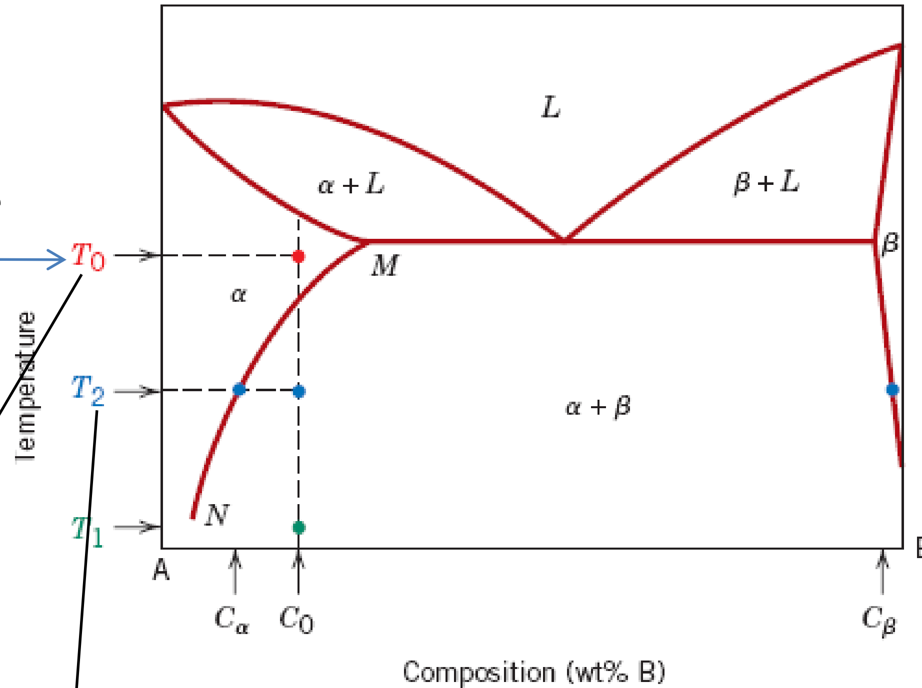
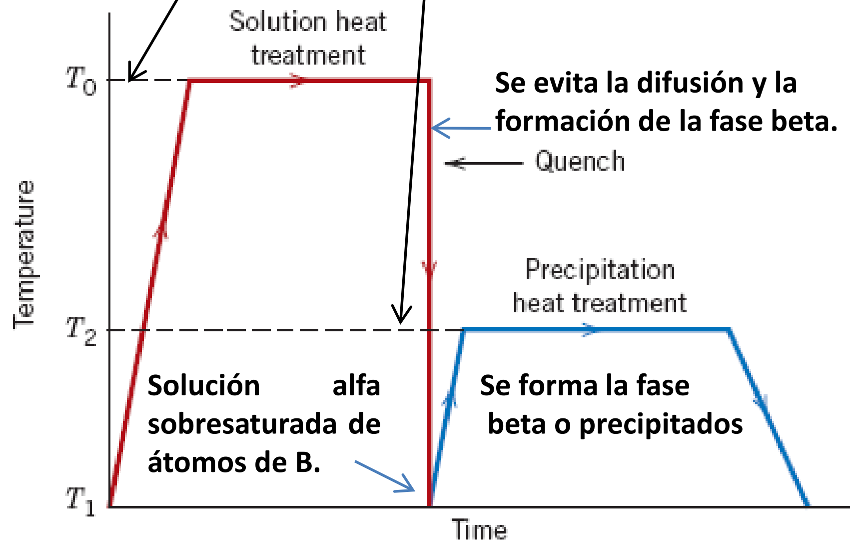
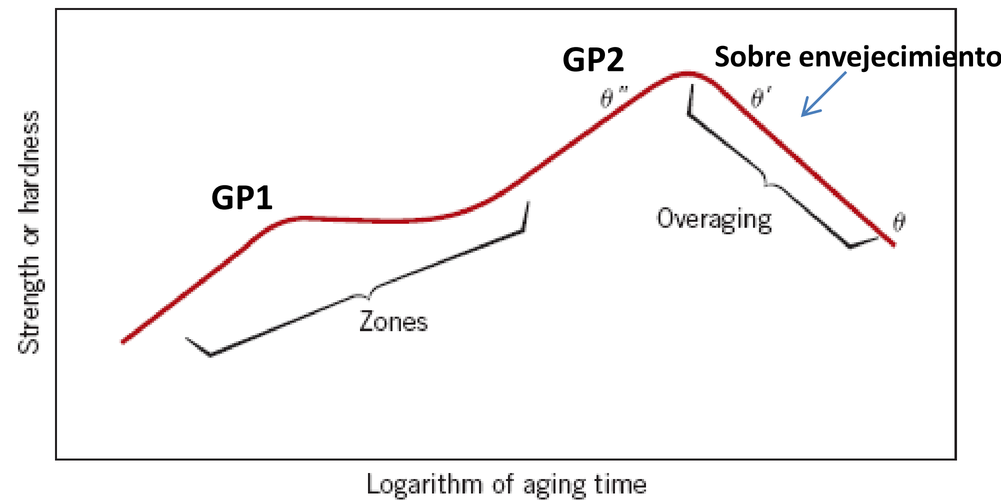


Figure 11.21 Hypothetical phase diagram for a precipitation-hardenable alloy of composition C_0.





GP1

Solvent (Al) atom

Solute (Cu) atom

Segregación de átomos de Cu

∝

(a)

Los átomos de Cu reemplazan los de Al

Discos de 0.4 nm de espesor y 8 nm de diámetro

GP2

θ" Phase particle

(b)

1-4 nm de espesor y 10 -100 nm de diámetro

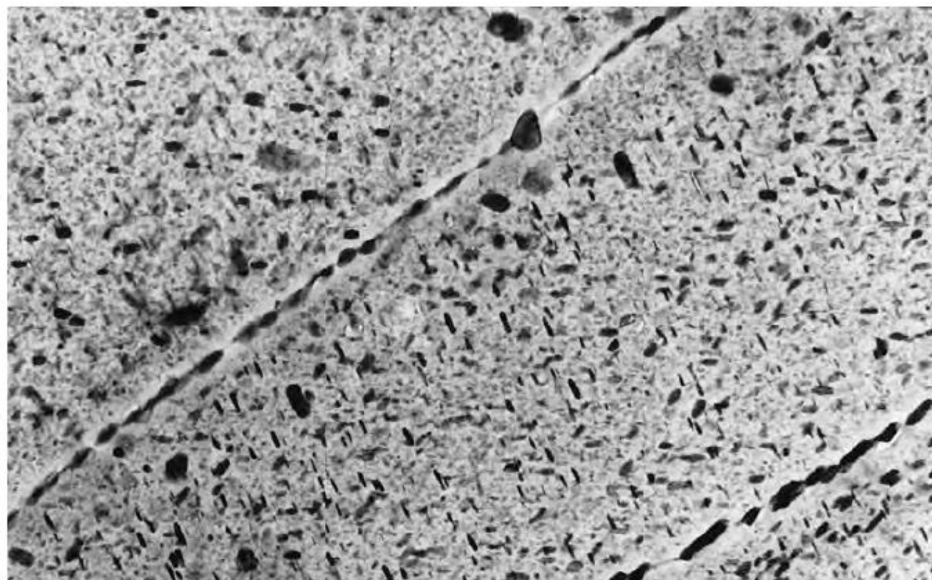
θ Phase particle

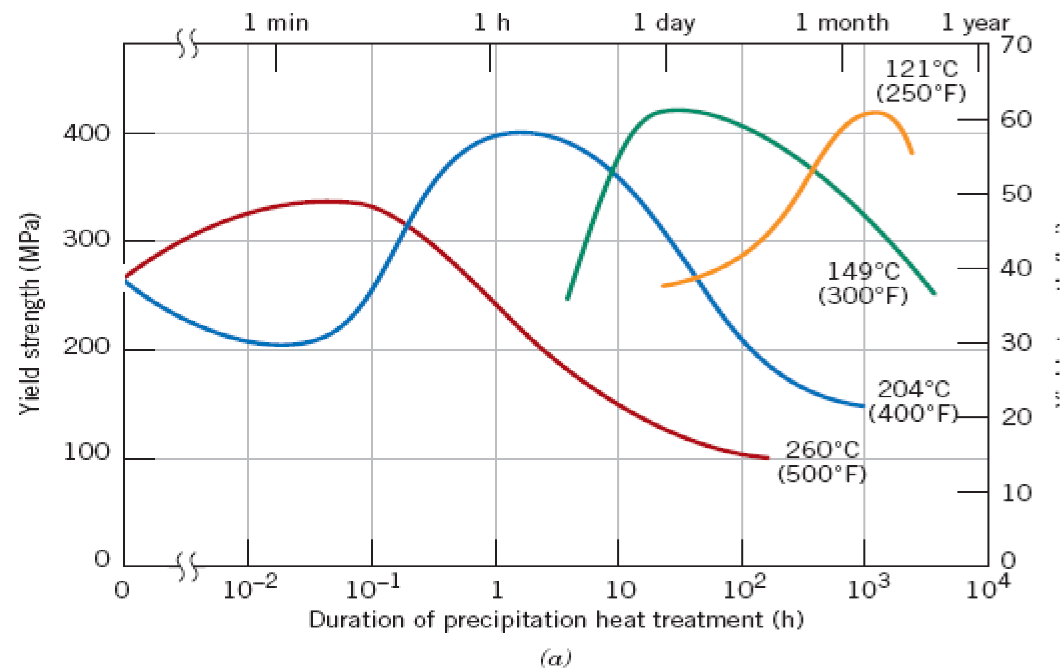
(c)

Estructura diferente a la matriz (incoherente). Tiene un espesor de 10- 50 nm, luego se forma $CuAl_2$.

$CuAl_2$

Figure 11.25 Schematic depiction of several stages in the formation of the equilibrium precipitate (θ) phase. (*a*) A supersaturated α solid solution. (*b*) A transition, θ'', precipitate phase. (*c*) The equilibrium θ phase, within the α-matrix phase.





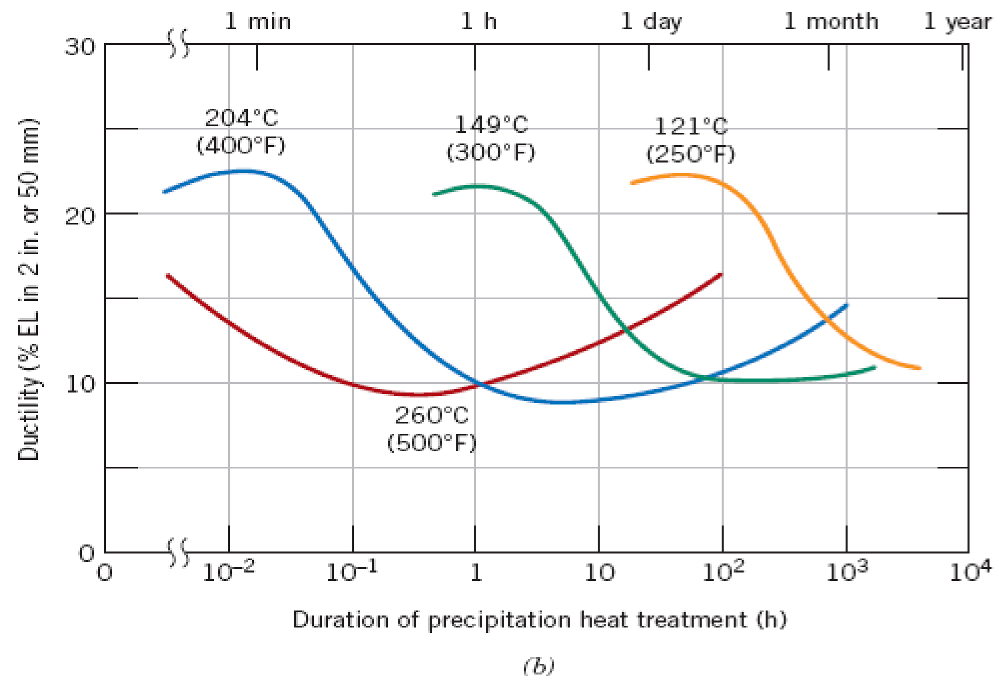


Figure 11.27 The precipitation hardening characteristics of a 2014 aluminum alloy (0.9 wt% Si, 4.4 wt% Cu, 0.8 wt% Mn, 0.5 wt% Mg) at four different aging temperatures: (*a*) yield strength, and (*b*) ductility (%EL). [Adapted from *Metals Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals,* Vol. 2, 9th edition, H. Baker (Managing Editor), American Society for Metals, 1979, p. 41.]

BIBLIOGRAFIA

Notas de clase, Dr. Vivek Roy, Heat Treatment Processes, LPU
https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/10-Temple_y_Revenido_v2.pdf
https://www.monografias.com/trabajos95/sistema-control-calidad-del-proceso-tratamiento-termico-del-acero-30xc/sistema-control-calidad-del-proceso-tratamiento-termico-del-acero-30xc.shtml
Notas de clase, Clasificación de las operaciones de Temple y variables que lo afectan, Ivan Romero.

BIBLIOGRAFIA

1. - Ciencia e Ingeniería de Materiales, William Smith
2. - Ciencia i. e ingeniería. de los materiales. Donald Askelan (ùltima ediciòn)
3. - I n t r o d u c c i ó n a l a Ciencia e Ingeniería de los Materiales. W i l l ik m d C a l l i s t e r
4. Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros para, 6 ta edición, Shackelford
5. - Manufactura, Ingenieria y Tecnologia, Serope Kalpakjian, ùltima ediciòn
6. - Introducción a la Metalurgia Física. Sydney Avner
7. Materials selection in Mechanical Desing, Michel Ashby.
8. Bases de datos, páginas de internet y artículos relacionados con la temática de Ciencia e Ingeniería de Materiales
9. Practicas de laboratorio (microestructuras y tenacidad).
10. Talleres, notas de clase e Iinformación o documentos usados en clase, que se puede encontrar en Google
11. Tesis de doctorado, Wilfrand Perez

PRIMER LABORATORIO TRATAMIENTOS TÈRMICOS

1. Recocido Total
2. Normalizado
3. Temple
4. Revenido

Material de estudio

1. Acero al carbono o de baja aleación
2. Acero para herramientas

Entregables: 1) Composición química 2) dureza y 3) microestructura